



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VOLBA A OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK PRO PROGRESIVNÍ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE

DATA SELECTION AND OPTIMISATION OF CUTTING CONDITIONS FOR
PROGRESSIVE PRODUCTION TECHNOLOGIES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Tomáš CAHA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Prof. Ing. Miroslav PÍŠKA, CSc.

BRNO

2015

ABSTRAKT

Tato práce zahrnuje teoretický popis problematiky volby a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie. Zvláště pak se zaměřením na CNC obrábění. Cílem experimentální části práce je stanovit takové řezné podmínky, aby byl proces výroby co nejekonomičtější s ohledem na výrobní možnosti firmy. Výrobek zároveň musí dosahovat požadované kvality, drsnosti povrchu a geometrické přesnosti.

Klíčová slova

Optimalizace, CNC obrábění, řezné podmínky, soustružení, drsnost povrchu

ABSTRACT

This thesis contents theoretical description of methods for choosing and optimization of cutting conditions for progressive machining technologies. Especially it is concerned on CNC machining. The aim of experimental part of work is to set cutting conditions and simultaneously to achieve the most economical solution under current production conditions of the company. The product must also comply with required quality, roughness of the surface and geometrical precision.

Klíčová slova

Optimisation, CNC machining, cutting conditions, turning, surface roughness

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CAHA, Tomáš. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2015. 54s. Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Bc. Tomáš Caha

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce prof. Ing. Miroslavu Píškovi, CSc. za cenné rady při psaní této práce.

OBSAH

ABSTRAKT	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	5
PROHLÁŠENÍ	6
PODĚKOVÁNÍ.....	7
OBSAH.....	8
ÚVOD.....	10
1. METODY VOLBY ŘEZNÝCH PODMÍNEK	11
1.1. Nástrojové materiály	11
1.2. Soustružení.....	12
1.3. Frézování	13
1.4. Vrtání, vyvrtávání a vystružování.....	14
1.5. Broušení	14
2. OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK.....	16
2.1. Konvenční optimalizace	16
2.2. Adaptivní optimalizace	18
2.3. Náklady.....	19
2.4. Kritéria optimálnosti	20
2.4.1. Výrobní náklady.....	21
2.4.2. Produktivita	21
2.4.3. Zisk.....	21
2.4.4. Úběr materiálu.....	21
2.4.5. Vícekriteriální optimalizace	22
2.5. Druhy omezení.....	22
2.5.1. Výkon obráběcího stroje	22
2.5.2. Maximální přípustný kroutící moment.....	23
2.5.3. Maximální přípustný ohybový moment	24
2.5.4. Maximálně přípustné síly	24
2.5.5. Vhodné utváření třísek	25
2.5.6. Drsnost obrobené plochy.....	25
2.5.7. Taylorův vztah a výpočty parametrů soustružení	27
2.5.8. Organizační omezení.....	28
2.6. Řezné prostředí	28
2.7. Lineární programování	30
3. EXPERIMENTÁLNÍ VERIFIKACE.....	31
3.1. Popis experimentu.....	31

3.2.	Obráběcí stroj MAS S80i.....	31
3.2.1.	Technické údaje.....	32
3.3.	Nástroje.....	33
3.3.1.	Hrubování.....	34
3.3.2.	Dokončování	35
3.3.3.	Řezání závitu M80x4	36
3.4.	Obráběná součást	37
3.4.1.	Materiál polotovaru a jeho vlastnosti	38
3.4.2.	Technologický postup výroby dle dokumentace firmy	39
3.5.	Měření drsnosti povrchu	40
3.5.1.	Měřicí přístroj.....	40
3.5.2.	Popis měření a naměřené výsledky	40
3.6.	Řezné podmínky	43
3.7.	Výsledek experimentu a návrh optimalizace	44
3.7.1.	Varianty výroby.....	45
3.7.2.	Výkon motoru a využití stroje (viz. Obr. 3.22)	48
3.7.3.	Ohybový moment na vřetenu	49
3.7.4.	Náklady na variantu A.....	50
3.7.5.	Náklady na variantu B.....	51
3.7.6.	Ekonomické zhodnocení obou variant	53
4.	ZÁVĚR.....	54
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	55
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	57
	SEZNAM PŘÍLOH	60

ÚVOD

Volba a optimalizace řezných podmínek je nedílnou součástí technologické přípravy výroby. Jejím cílem je nastavit podmínky výroby tak, aby proběhla co nejefektivněji z hlediska času výroby, nákladů na výrobu nebo trvanlivosti nástrojů. Zároveň musí být dodržena požadovaná drsnost povrchu a kvalita výrobku. Význam a důležitost optimalizace řezných podmínek roste s počtem vyráběných kusů v sérii nebo výrobní dávce. Největší vliv na tuto problematiku má však relativně rychle rostoucí technický rozvoj strojů, nástrojů a jejich materiálů [1,2].

Náklady na hodinu práce na CNC stroji jsou vyšší než na konvenčních strojích a proto jsou kladené vysoké nároky na snížení výrobních časů a tím pádem zvyšování řezné rychlosti. Obráběcí stroje však pracují ve svém určitém rozsahu a ne všechny konvenční stroje jsou schopné pracovat v tak vysokých hodnotách řezné rychlosti, posuvové rychlosti nebo hloubky třísky. Tyto podmínky zároveň vyžadují používání nových odolných materiálů a jejich vývoj. CNC stroje dále umožňují dvou či vícestrojovou obsluhu, kdy jeden pracovník je schopen obsluhovat dva a více strojů bez trvalého dozoru u každého stroje. Tato výhoda pozitivně ovlivňuje náklady na pracovníka, avšak zvyšuje riziko vzniku havárie v soustavě nástroj-obrobek. Například může dojít ke změně řezných podmínek vlivem vmětku v materiálu, který způsobí špatnou lámavost třísky, což může vést k nedodržení kvality obrobku nebo k destrukci nástroje. Obsluha konvenčního stroje může této situaci zabránit okamžitým zastavením stroje [1,2].

Optimalizace je prováděna na základě dvou základních vstupních parametrů. A to kritérium optimálnosti a omezující podmínky. Při kompletaci těchto kritérií a podmínek je nutné vycházet z dokumentace, která zahrnuje obrobitelnost materiálu, rozměr polotovaru, přídavky na obrábění, atd. Dále můžeme optimalizaci rozdělit na konvenční a adaptivní. Konvenční optimalizace stanovuje řezné podmínky před procesem obrábění, zatímco adaptivní optimalizace řeší řezné podmínky v průběhu obrábění. Princip, matematický model a vstupní podmínky jsou totožné. Avšak adaptivní optimalizace navíc pracuje s údaji od snímačů, které zaznamenávají aktuální stav obrábění (např.: teplota třísky, hloubka řezu, deformace nástroje, atd.) [1,2].

Vhodně zvolené řezné podmínky mají velký vliv na celkovou ekonomičnost výroby a konečnou cenu pro zákazníka. Snaha o snižování konečné ceny a zároveň zvyšování kvality utváří konkurenceschopnost firmy. Tato práce se zaměřuje na zhodnocení metod optimalizace, zefektivnění obrábění konkrétní plochy volbou řezných podmínek a následnou realizací [1,2].

1. METODY VOLBY ŘEZNÝCH PODMÍNEK

Přesnost rozměrů a drsnost povrchu je při procesu obrábění ovlivněna zejména volbou řezných podmínek, geometrií a materiálem nástroje, tuhostí stroje nebo materiálem samotného obrobku. Při hrubování je prioritní co největší hloubka třísky (odběr materiálu) za jednotku času. Ideální stav by odpovídal obrobení celého přídavku na hrubování na jednu hloubku třísky, ale parametry stroje tento stav ve většině případů nedovolují. Kvalita povrchu není v tomto případě podstatná z důvodu dalšího opracování plochy. Při obrábění na čisto je nutné docílit požadavků výkresové dokumentace (především rozměrů a drsnosti povrchu). V tomto případě už velikost přídavku na obrábění na čisto nepředstavuje překážku pro možnosti stroje [10].

Zejména při obrábění na čisto jsou kladeny vysoké nároky na řezné podmínky z důvodu dodržení kvality povrchu. Vysoká řezná rychlost způsobuje větší vznik tepla. Z toho důvodu je nutné využití chladicí kapaliny. Chladicí kapalina odvádí část tepla, které vzniká při obrábění, snižuje tření a odplavuje třísky[10].

1.1. Nástrojové materiály

Vyměnitelné břitové destičky (dále jen VBD), případně celé nástroje jsou vyráběny z nástrojových materiálů, na které jsou kladeny vysoké požadavky. Zejména na jejich tvrdost, pevnost, houževnatost, odolnost proti otěru nebo trvanlivost. Tyto vlastnosti musí být zachovány i při vysokých teplotách a po dlouhou dobu obrábění. Základní vlastností řezných materiálů je tzv. řezivost, která je kvalifikována pomocí řezné rychlosti, při které nedojde ke změně tvrdosti nástroje po dobu obrábění.

Základní rozdělení nástrojových materiálů [4]:

- Nástrojové oceli (NO)
- Slinuté karbidy (SK)
- Řezná keramika
- Cermety
- Kubický nitrid bóru (CBN)
- Polykrystalický diamant (PCD)

Nástrojové oceli (NO)

Oceli třídy 19 se základně dělí na legované a nelegované. Pro obrábění pevných a tvrdých materiálů a nástrojových materiálů jsou využívány rychlořezné nástrojové oceli. Za účelem získání ještě lepších vlastností jsou nástrojové oceli tepelně zpracovávány [4].

Slinuté karbidy (SK)

Slinuté karbidy jsou vyráběny práškovou metalurgií. Jedná se o směsi karbidů a kovového pojiva. Poměr těchto složek dále ovlivňuje konečné vlastnosti materiálu. Nástroje o základní velikosti jsou vyráběny jako soustava VBD ze slinutého karbidu a tělo nástroje (držák) z konstrukční nebo nástrojové oceli. V případě malých rozměrů lze využít karbid pro výrobu celého nástroje. Pro zvýšení řezných vlastností jsou nástroje opatřeny jednou nebo více vrstvami povlaku [4,9].

Řezná keramika

Primární výhodou řezné keramiky oproti ostatním materiálům je její vysoká tvrdost za tepla, ale naopak vykazuje vysokou křehkost a nízkou tepelnou vodivost. Stejně jako u slinutých karbidů je řezná keramika používána ve formě VBD. Nejčastěji využívané jsou keramiky na bázi oxidu hlinitého a nitridu křemíku [4].

Cermety

Stejně jako slinuté karbidy jsou cermety vyráběny pomocí práškové metalurgie. Směs materiálu tvoří tvrdé keramické části a kovové pojivo. Tvrdost keramiky a houževnatost kovu je tak výhodně zkombinovaná v jednom materiálu [4].

1.2. Soustružení

Soustružení je metoda obrábění, jejímž cílem je výroba převážně rotačních součástí. Kinematika obráběcího procesu se zabývá charakterizováním řezné rychlosti, posuvové rychlosti a rychlosti řezného pohybu (viz. Obr. 1.1). Hlavní rotační pohyb koná obrobek a vedlejší posuvný pohyb koná nástroj. Řezný pohybem je tedy spirála (v případě čelního soustružení se jedná o Archimedovu spirálu) [4,18].



Obr. 1.1 – Soustružení [26].

Při soustružení volíme řezné podmínky nejdříve s ohledem na velikost přídavku, ze kterého vychází šířka záběru ostří „ a_p “. Ta je omezena délkou ostří nástroje a neměla by být větší než 2/3 její délky. V ideálním případě odebíráme celý přídavek na jednu operaci. Dále je šířka záběru ostří omezena tuhostí stroje a nástroje. Obvykle se pohybuje v rozmezí od 0,03 do 30 [mm]. V dalším kroku stanovíme velikost posuvu na otáčku „ f “. Posuv do značné míry ovlivňuje výslednou kvalitu povrchu, a proto by jeho volba měla vycházet z požadavků ve výkresové dokumentaci. To je však omezeno geometrií nástroje, tuhostí a možnostmi stroje. Velikost posuvu je nepřímo úměrná kvalitě povrchu. Čím menší posuv, tím kvalitnější povrch. Standartní rozsah posuvu na otáčku se pohybuje od 0,05 do 2 [mm]. Řezná rychlost „ v_c “ se pohybuje od 10 do 600 [m/min] v závislosti na druhu obráběného a nástrojového materiálu. Nízké řezné rychlosti jsou využívány pro obrábění legovaných ocelí, střední pro uhlíkové nelegované oceli nebo litiny a vysoké pro obrábění hliníku a slitin hliníku. Při využívání krajně vysokých řezných rychlostí je nutné využití povlaků. Hodnoty výše uvedených veličin lze vyjádřit dle následujících základních vztahů [4,10].

Řezná rychlost [4]

$$v_c = \pi \cdot D \cdot n \cdot 10^{-3} [m/min] \quad (1.1)$$

kde: v_c [m/min] je řezná rychlost,
 D [mm] je průměr obráběné plochy,
 n [min⁻¹] jsou otáčky na obrobku.

Posuvová rychlost [4]

$$v_f = f \cdot n \cdot 10^{-3} [m/min] \quad (1.2)$$

kde: v_f [m/min] je posuvová rychlost,
 f [mm] je posuv na otáčku.

Šířka záběru ostří [4]

$$a_p = \frac{1}{2} \cdot (D - d) [mm] \quad (1.3)$$

kde: a_p [mm] je šířka záběru ostří,
 d [mm] je průměr obrobené plochy.

1.3. Frézování

Frézování je metoda obrábění rovinných a tvarových ploch, zejména nerotačních součástí. Nástroj je vícebřitá fréza. Na rozdíl od soustružení probíhá frézování v úsecích, kdy každý břit frézy zvlášť odebírá materiál. Základní rozdělení je na čelní a válcové podle toho, která část frézy je v záběru. Nástroj koná hlavní otáčivý pohyb a obrobek vedlejší posuvný pohyb. Řezný pohyb probíhá po cykloidě. Kinematika válcového frézování umožňuje zvolit sousledné nebo nesousledné frézování. Mnoho různých klasických i tvarových nástrojů umožňují dosažení obrobení velké škály ploch a kvalit povrchu. To je však omezeno řeznými podmínkami a možnostmi stroje [4,18].



Obr. 1.2 – Frézování [28].

Šířka záběru ostří „ a_p “ se pohybuje v rozsahu od 0,5 do 20 [mm] s ohledem na způsob frézování. Při nesousledném frézování probíhá od nuly do maxima (viz. Obr. 1.2) a při sousledném frézování od maxima do nuly (viz. Obr. 1.3). Základní jednotka pro frézování je

posuv na zub „ f_z “, což je délka dráhy obrobku za dobu jednoho záběru. Posuv na otáčku je délka dráhy obrobku připadající na jednu otáčku nástroje [8,10].

Posuv na otáčku [8]

$$f = f_z \cdot z \text{ [mm]} \quad (1.4)$$

kde: f_z [mm] je posuv na zub,
 z [-] je počet zubů.

1.4. Vrtání, vyvrtávání a vystružování

Vrtání je metoda obrábění vnitřních, převážně rotačních ploch. Tvary děr mohou být různé, ale nejčastější a zároveň nejméně náročné jsou rotační díry. Základní rozdělení této metody je obrábění do plného materiálu a zvětšování už předpřipravených děr, stejnou nebo rozdílnou metodou. Hlavní i vedlejší pohyb vykonává nástroj (vrták). V ideálním případě je osa vrtáku kolmá na obráběný povrch. Odvod třísky zajišťuje geometrie vrtáku, pouze při výrobě slepých (neprůchozích) děr je nutné dbát na zakončení třísky u dna díry. To je zajištěno zastavením posuvu vrtáku při spuštěných otáčkách a setrváním v tomto stavu před ukončením operace. Pro řezné podmínky při vrtání je charakteristický pokles řezné rychlosti směrem od obvodu vrtáku k jeho středu, kde má nulovou hodnotu. Na obvodu vrtáku je řezná rychlost vypočítána stejně jako u soustružení (viz. vzorec 1.1) [8].

Rozdělení vrtání [8]:

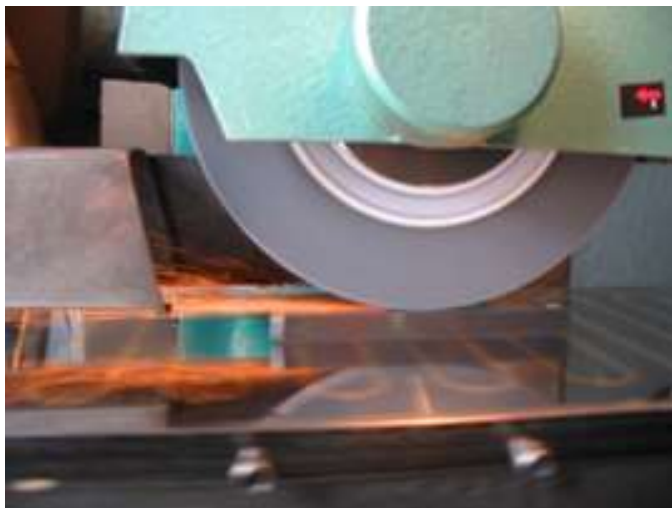
- Navrtávání středícím vrtákem
- Vrtání krátkých děr
- Vrtání předpřipravených děr
- Vrtání hlubokých děr
- Speciální druhy vrtání

Při použití klasických šroubových nebo kopinatých vrtáků je možné dosáhnout drsnostem odpovídajícím hrubování. Pro dosažení kvalitnějších povrchů na čisto je nutné použít vystružování pomocí dělových vrtáků s VBD, často v kombinaci s chladicí kapalinou. Hloubku záběru určuje průměr nástroje, případně rozdíl průměru nástroje a průměru předvrtané díry. Pro dosažení vysoké kvality povrchu je nutné vhodně zvolit hloubku záběru pro jednotlivé operace (výhrubník 0,3 až 1 mm a výstružník 0,1 až 0,3 mm). Posuv na otáčku se pohybuje řádově v desetinách a setinách milimetru. Na jeho volbu má přednostní vliv druh nástroje a obráběný materiál [10,18].

1.5. Broušení

V dnešní době jsou čím dál více kladené nároky na vysokou kvalitu a drsnost povrchu. Broušené povrchy s drsností menší než $Ra\ 0,8$ zaručují vyšší životnost materiálu a jeho odolnost proti opotřebení. Broušení můžeme zařadit jako dokončovací operaci. Nástroj – brusný kotouč je tvořen brusnými zrny a pojivem, jejichž geometrii není možné konstantně definovat (viz. Obr. 1.3) [18].

Malá brusná zrna přenášejí pouze malé řezné síly z důvodu aretace pojivem. Třísky mají malý průřez, přičemž některé shoří díky vysokým teplotám, které způsobuje vysoké tření mezi nástrojem a obrobkem. Vysoká teplota a především vzniklé teplo může způsobit trhliny a změnu struktury, protože oduhličuje povrch. Tomuto jevu se dá částečně zabránit chlazením nástroje [18].

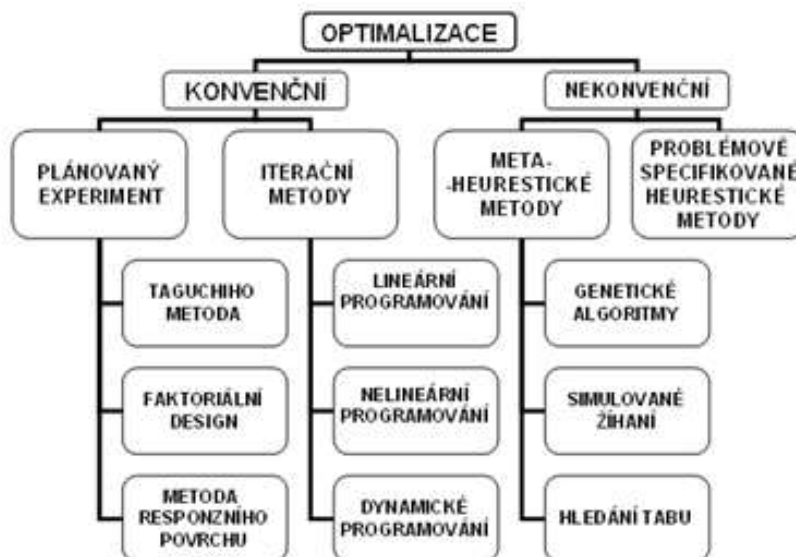


Obr. 1.3 – Broušení [29].

Hloubka záběru brusného kotouče se oproti ostatním metodám obrábění pohybuje v řádech tisícín milimetrů. Pro částečnou eliminaci pružných deformací soustavy se používá tzv. vyjiskřování (zarovnání povrchu plnými otáčkami s nulovou hloubkou záběru). Posuv na otáčku se pohybuje od 8 do 35 m/min. Naopak řezná rychlost je vysoká a je závislá především na druhu nástroje a druhu použitého pojiva. Pro dosažení řezných rychlostí vyšších než 120 m/s se používají speciální kotouče s keramickou vazbou [10,18].

2. OPTIMALIZACE ŘEZNÝCH PODMÍNEK

Optimalizaci můžeme rozdělit na dva základní druhy – konvenční a adaptivní. Konvenční optimalizace je provedena ještě před realizací výroby, zatímco adaptivní optimalizace probíhá přímo při výrobě. Jejich základy a principy jsou téměř totožné s jedním základním rozdílem. Adaptivní optimalizace využívá aktuálních záznamů ze snímačů umístěných na stroji nebo nástroji, který je právě v provozu (viz. Obr. 2.1) [1].



Obr. 2.1 – Přehled optimalizačních metod [12].

2.1. Konvenční optimalizace

Proces obrábění je v dnešní době ovlivňován mnoha faktory od vývoje nových technologií výroby a výrobních materiálů, přes ekonomické vlivy až po ekologii. Veškeré tyto faktory je nutné zahrnout do optimalizace řezných podmínek. Nemalou část zaujímá ekologie, která zužuje možnosti výběru např. řezných kapalin na bázi ropy a nahrazuje je ekologickými alternativními variantami kapalin. Množství těchto faktorů neustále roste a tím roste i náročnost samotné optimalizace. Během navrhování technologie výroby určité součásti se ve většině případů nabízí více možností řešení, které vyžadují stále detailnější ekonomické výpočty. Zvláště pak při technologii obrábění, která je z hlediska počtu vstupujících faktorů a náročnosti výpočtů jedna z nejkomplikovanějších. Takovéto výpočty jsou časově náročné a vyžadují vysokou kvalifikaci pracovníka, proto zůstává cílem optimalizovat proces s takovou úsporou, která pokryje minimálně náklady na samotnou optimalizaci [7,11].

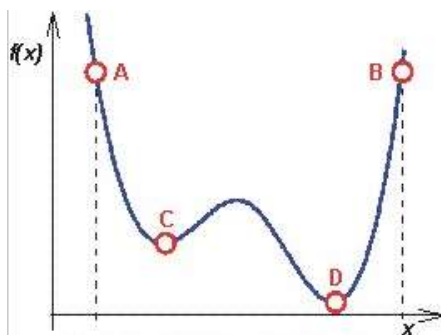
Navazující operací optimalizace je technologická příprava výroby. Pro určení nejlepší varianty výroby je nutné uvažovat sled operací, který může nakonec být rozhodující pro volbu výrobní varianty. Není ovšem zaručeno, že každá varianta dokáže zajistit požadovanou kvalitu výrobku a proto je nutný detailní rozbor všech možností. Dalším krokem je výběr strojů s ohledem na výrobní možnosti firmy, případně možnosti kooperace. Tento výběr je v první řadě ovlivněn druhem výrobku, velikostí výrobní dávky (celé série), atd. Pro firmu zabývající se převážně sériovou výrobou totožných nebo podobných výrobků je možné toto rozhodnutí učinit přímo na základě ekonomického rozboru[1,11].

Konkrétně pro obrábění zahrnujeme do nejdůležitějších technologických faktorů materiál a geometrii nástroje a v neposlední řadě obráběný materiál. Pro samotný proces jsou to řezné podmínky (řezná rychlost, otáčky za minutu, posuvová rychlost), trvanlivost nástroje a prostředí. Ostatní procesy (slévání, kování, atd.) mají většinou nižší počet těchto faktorů.

Pakliže byly zpracovány ekonomické výpočty a určený výrobní stroje, přichází na řadu volba nástrojů pro jednotlivé stroje a výrobní úseky. Tento výběr je do značné míry ovlivněn výrobními možnostmi firmy. V tomto bodě je nutné zvážit ekonomickou bilanci nákupu (výroby) nových přípravků, strojů, případně zaškolení nového personálu oproti výrobě v kooperaci. To vše v závislosti na sériovosti případně možnosti opakování výroby totožného nebo podobného výrobku. Je možné i zařazení nových technologií (dílky pro povrchové úpravy, zařazení pracoviště pro tepelné zpracování, přechod z konvenčního obrábění na CNC obráběcí centra, atd.). V některých případech není možné zajistit jednoúčelové nástroje, proto je nutné z technologického hlediska uvažovat spíše o víceúčelových nástrojích [11].

V této fázi přicházejí na řadu samotné výpočty řezných podmínek a výpočet trvanlivosti nástrojů. To vše na základě kritéria, které si před procesem optimalizace musíme určit. Je možné se zaměřit na minimalizaci výrobních nákladů, zvýšení produktivity, zvýšení zisku nebo minimalizaci přídávků na obrábění. V případě výrobních nákladů jsou všechny výrobní varianty na konci procesu optimalizace ekonomicky vyhodnoceny a následně je vybrána nejlepší varianta. Nejdůležitějším a zároveň nejčastěji nejvíce opomíjeným faktorem jsou řezné podmínky. Přičemž jejich volba je oproti nákupu nových nástrojů, přípravků, strojů, atd. finančně nejméně nákladná. Důvodem je neznalost a nízká kvalifikace pracovníků potřebná pro jejich výpočet. Výjimkou je kusová výroba, při které úspora vzniklá náročným výpočtem řezných podmínek nemůže dosáhnout nákladů na výpočtáře [1,6].

Principem optimalizace je určení ideálního bodu kritériální funkce za podmínky dodržení omezení (viz Obr. 2.2). Omezení může být například eliminace zbytkového pnutí v povrchu materiálu, spolehlivost, drsnost povrchu, atd. Tyto omezení není možné nazvat kritériem, protože jejich dosažení je možné jinými technologiemi až po procesu obrábění [13].



Obr. 2.2 – Kritériální funkce (bod C – lokální minimum, bod D – globální minimum) [13].

Optimalizaci celého výrobku můžeme rozdělit do jednotlivých obráběcích operací, které mají své individuální náklady na výrobu. Dodržení těchto substitučních nákladů zajistí minimalizaci celkových nákladů a tím i zvýší prodejnost výrobku. Stále však musí být dodržena kvalita výrobku, drsnost povrchu, atd. Zvýšení zisku za jeden výrobek exponenciálně roste v závislosti na velikosti série. Malá úspora na jednom kusu může v celkové měsíční (roční) ekonomické bilanci přinést přebytečné finance využitelné v oblasti vývoje a výzkumu. Tento proces ovšem nelze na jednom typu výrobku aplikovat donekonečna. Je důležitý spíše při zavádění nového výrobku, kdy každá optimalizace může vést k markantním úsporám. Pro stávající výrobek je efektivnější hloubková analýza, jejíž aplikace má smysl od určité velikosti série, popřípadě výrobní dávky. Pro tyto výpočty je nutný kvalitní software, výkon počítačové techniky, databáze a kalkulace [11].

Zaměření se na výrobní náklady je stále nejčastějším přístupem většiny strojírenských a jiných firem. Ostatní kritéria včetně vícekritériální optimalizace zůstávají v pozadí. Optimalizace zastupuje velmi důležitou součást technické přípravy výroby a přímo ovlivňuje úspěšnost firmy na trhu. V případě malých firem i jejich existenci. V mnoha případech ale zůstává optimalizace značně opomíjená a úspory ve výrobě jsou laicky hledány v oblastech,

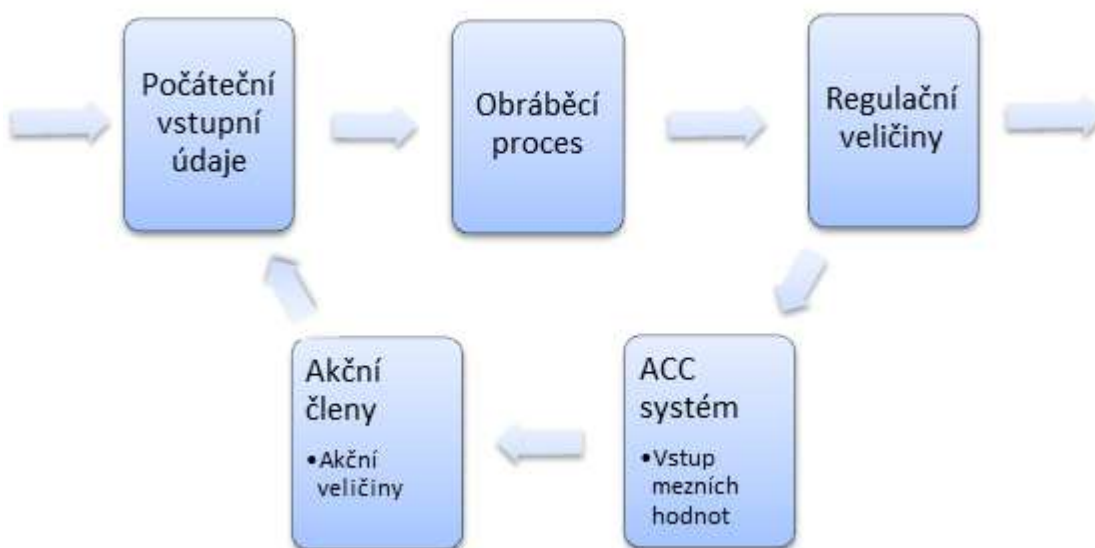
kde nemohou dosáhnout srovnatelné hodnoty. V dnešní době jsou náklady na výrobu prioritou číslo jedna, protože zajišťují konkurenceschopnost firmy, její existenci a udržitelnost zákazníků. Značnou míru komplikace v optimalizaci způsobují stále větší požadavky na ekologii výroby a tím nemalou částí omezují počet variant výroby, případně jejich rozsah [7,11].

Dělení optimalizace [7]:

- Práce s jedním nástrojem
- Práce na jednom stroji s použitím více nástrojů
- Práce více strojů zařazených do výrobní linky (vliv taktu linky)
- Práce více strojů vázaných organizačně

2.2. Adaptivní optimalizace

V současnosti je adaptivní optimalizace aplikována spíše na NC (CNC) obrábění, to ale neznamená, že nelze využít pro klasické konvenční obrábění. Mezi veličiny, které snímače sledují můžeme zařadit příkon stroje, řeznou sílu, krouticí moment na vřetenu, teplotu, drsnost obrobené plochy, míru opotřebení nástroje, atd. Ty veličiny, které můžeme během procesu obrábění měnit, jsou akční členy [2,6].



Obr. 2.3 – Blokové schéma adaptivní optimalizace [11].

Mezní systémy

U těchto systémů jsou optimalizovány otáčky na vřetenu a posuv nástroje nebo posuv nástroje a hloubka řezu. Smyslem této optimalizace je co nejvíce maximalizovat hloubku řezu s podmínkou dodržení omezujících podmínek a kvality povrchu. Hodnoty regulačních veličin jsou porovnávány s jejich mezními hodnotami (viz. Obr. 2.3). Pokud jsou všechny veličiny pod mezní hranicí, je možné proces urychlit (zvýšit otáčky, zvýšit posuv, atd.) až do té doby, než kterákoliv z veličin dosáhne mezní hranice. Pokud by byla překročena mezní hranice jakékoliv veličiny, musí neprodleně dojít ke snížení všech hodnot [2].

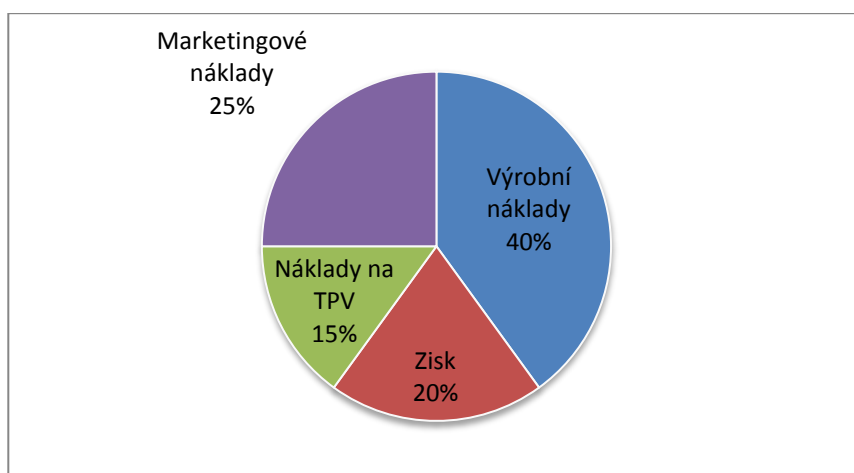
Optimalizační systémy

Tyto systémy optimalizují řeznou rychlost v závislosti na posuvu nebo hloubku řezu a to s ohledem na kritérium minimálních nákladů. Z toho vyplývá závislost mezi řeznými podmínkami a trvanlivostí nástroje. Tento druh optimalizace již není možné znázornit

blokovým schématem jako u mezních systémů, ale je třeba provedení kalkulace na počítači, který je přímo propojen s řídicím systémem u obráběcího stroje. Měřené regulační veličiny jsou podobné jako u mezních systémů [2].

2.3. Náklady

Aby bylo možné vůbec uvažovat o zavedení výroby nového produktu, je nutné zhodnotit náklady připadající na jeden kus, případně náklady na výrobní středisko, které tvoří převážnou část celkových nákladů (viz. Graf 2.1). Náklady na výrobní středisko jsou prioritním měřítkem, protože zisk z prodeje je sumarizován až na konci celého procesu. Není důležité, aby každá část výrobního procesu byla zisková, ale aby byl ziskový celý proces. Zisk pro jednotlivé výrobní úseky se stává prioritním až v případě, kdy realizujeme malé kooperační zakázky (např.: obrábění součástí velkých rozměrů, žárové nástřiky, nátěry, speciální typy svařování, atd.). Tyto malé zakázky však tvoří pouze malou část celkového zisku firmy. Jakoukoliv technickou variantu výroby je nutné zvážit s ohledem na náklady, protože ne každý technicky dokonalý výrobek je možné vyrobit s náklady přijatelnými pro celkovou ziskovou kalkulaci výrobku [11].



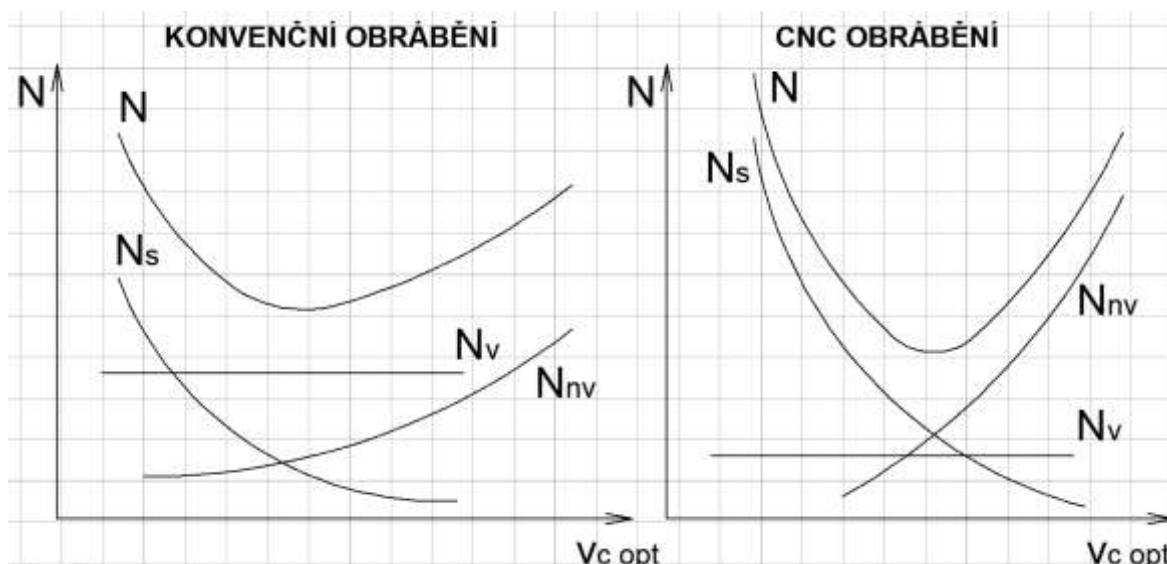
Graf 2.1 – Rozložení nákladů [11].

Náklady je možné vyhodnocovat z mnoha různých pohledů, resp. se mohou vztahovat na různé části výroby. Nejpoužívanější jsou náklady na středisko. Ty se vztahují na jednu výrobní jednotku, bez ohledu na to, jakou operaci provádíme nebo jaký výrobek je v danou dobu ve výrobě. Ani drobné konstrukční změny na výrobku nemají na tyto náklady vliv. Náklady na středisko se dělí na dva základní druhy – přímé a nepřímé. Přímé náklady jsou vyhodnoceny přímo z výrobního procesu (operace), počítají se tehdy, když výrobní stroj nebo výrobní dělník vytvářejí hodnotu na výrobku. Jejich kalkulace není nijak složitá, protože lze jednoznačně matematicky určit. Nepřímé náklady neboli režie není možné přiřadit přímo ke konkrétní operaci. Nicméně pro chod výroby a potažmo celé firmy jsou nezbytné. Lze mezi ně zařadit např. náklady na režijní pracovníky, náklady na opravy, údržbu a seřízení strojů, náklady na energie nebo odpisy. Nepřímé náklady rostou lineárně s velikostí firmy a podrobněji je lze zařadit do následujících kategorií [11]:

- Režijní materiál – řezné kapaliny, ochranné pomůcky, krycí fólie pro povrchy bez nátěru
- Nářadí a nástroje – např. universální přípravky, které nelze přiřadit pouze k jednomu výrobku
- Odpisy investičního majetku
- Sociální a zdravotní pojištění – část mzdy každého pracovníka

- Údržba a opravy
- Ostatní služby – pronájem, školení, náklady na likvidaci odpadu, náklady na zmetkové výroby, poplatky za auditory, leasing služebních vozů, atd.

V následujícím obrázku (viz. Obr. 2.4) je znázorněno porovnání závislosti nákladů na řezné rychlosti. Je zde patrný rozdíl nákladů na vedlejší práci při konvenčním obrábění a CNC obrábění.



kde: N [Kč] jsou výrobní náklady,
 N_s [Kč] jsou náklady na strojní práci,
 N_{nv} [Kč] jsou náklady na nástroje a jejich výměnu,
 N_v [Kč] jsou náklady na vedlejší práci.

Obr. 2.4 – Porovnání nákladů na konvenční a CNC obrábění [11].

Všechny tyto náklady spadají do kategorie nezařaditelné pro konkrétní pracoviště nebo středisko. Některé nepřímé náklady lze přiřadit (např.: spotřeba energie určitého stroje, náklady na repasování určitého stroje, atd.). Tento systém řízení nákladů vztažených na střediska je efektivní avšak vyžaduje použití měřidel na střediscích tak, aby bylo možné je jednoznačně zařadit. Celý proces také vyžaduje odbornější a složitější přístup. Každá firma má určitý počet středisek a každé středisko má určitý počet pracovišť. Celkové náklady je proto nutné nejen rozdělit mezi jednotlivá střediska, ale také řádně sledovat a vyhodnotit pro určitý časový horizont. Pokud bychom toto rozřazení ignorovali a přiklonili se spíše k variantě celkových nákladů, zajistíme si tak jednodušší přístup a vyhodnocování, ale za cenu nižší objektivity a získání přehledu o nákladech. Abychom mohli správně vypočítat řezné podmínky, musíme znát přesně výrobní náklady a to nejlépe u těch procesů, které jsou nezbytné k realizaci výroby. Tyto náklady však nemusí být vždy konstantní. Jejich kolísání způsobuje především změna využití kapacity výroby. Pokud zahrneme i tento vliv, můžeme náklady rozdělit na fixní (ty které zůstávají stejné) a variabilní (ty které jsou přímo úměrné počtu vyrobených kusů) [11].

2.4. Kritéria optimálnosti

Při soustružení je převážně uvažováno s postupným střídáním nástrojů, přičemž je v záběru vždy pouze jeden nástroj. Tento stav je nazýván jednonástrojová optimalizace. V opačném případě, kdy jsou v záběru dva nástroje nebo více, je výpočet řezných podmínek velice komplikovaný a je proveditelný pouze na výkonném PC. Dále je nutné zohlednit universálnost výpočtového softwaru, který nemusí být vždy využitelný pro konkrétní

podmínky firmy. Ve většině případů se proto volí řezné podmínky na základě doporučení výrobce [1].

2.4.1. Výrobní náklady

Kritérium minimálních výrobních nákladů je v dnešní době nejčastěji využívaným kritériem. Získání přehledu o nákladech je úzce spjato s řízením výroby a hospodárností výroby. Téměř každou činnost ve firmě lze vyjádřit pomocí nákladů, což je nezbytné k získání celkového přehledu. Za předpokladu, že nejsou zahrnuty jiné nákladové položky, které přímo ovlivňují řezné podmínky, lze minimální náklady vypočítat dle následujících vzorců [2].

Celkové výrobní náklady na obrobek [1]

$$N_c = \sum_1^{uu} N_i + N_v + \frac{N_B}{d} + \frac{N_{SZ}}{d} \text{ [Kč]} \quad (2.1)$$

kde: N_c [Kč] jsou celkové výrobní náklady na obrobek,
 N_i [Kč] jsou výrobní náklady i-tý operační úsek,
 N_v [Kč] jsou náklady na vedlejší práci,
 N_B [Kč] jsou náklady dávkové,
 N_{SZ} [Kč] jsou náklady na speciální zařízení,
 d [ks] je počet vyráběných kusů,
 uu [-] je počet operačních úseků na obrobku.

2.4.2. Produktivita

Kritérium optimálnosti z hlediska produktivity, využívané spíše v minulosti, definuje maximální počet výrobků, které je firma schopna vyrobit za jednotku času. Minimální výrobní náklady zde nejsou prioritní veličinou, naopak při jejich zvýšení se snažíme dosáhnout co možná největšího počtu vyrobených kusů. Tato metoda je uplatňována především při možném nedodržení výrobních termínů, což zahrnuje riziko smluvní pokuty ze strany zákazníka. Avšak nabízejí se i jiná řešení ve formě nasazení vícesměnného provozu nebo zadání části zakázky do kooperace. Čistě matematicky je řešení kritéria optimálnosti z hlediska produktivity stejné jako řešení kritéria optimálnosti s ohledem na výrobní náklady. Základním ukazatelem je minimální čas výroby [6].

Minimální čas na obrobení jednoho operačního úseku [1]

$$t_u = t_{AS} + t_{vn} \cdot z_v \text{ [min]} \quad (2.2)$$

kde: t_u [min] je minimální čas na obrobení jednoho operačního úseku,
 t_{AS} [min] je strojní čas,
 t_{vn} [min] je čas na výměnu nástroje,
 z_v [-] je počet výměn nástroje.

2.4.3. Zisk

Řešení kritéria optimálnosti s ohledem na zisk je totožné s řešením kritéria optimálnosti s ohledem na výrobní náklady [1].

2.4.4. Úběr materiálu

Toto kritérium je totožné s kritériem optimálnosti s ohledem na produktivitu pouze za jedné podmínky a to pokud budeme vycházet z trvanlivosti nástroje stanovené kritériem produktivity. Obdobný případ nastane, pokud budeme vycházet z trvanlivosti nástroje

stanovené kritériem výrobních nákladů. V tom případě bude toto kritérium totožné s kritériem nákladů. Základním parametrem je v tomto případě úběr materiálu [1].

Úběr materiálu

$$U = a_p \cdot f \cdot v_c \text{ [cm}^3\text{/min]} \quad (2.3)$$

kde: $U \text{ [cm}^3\text{/min]}$ je úběr materiálu.

2.4.5. Vícekriteriální optimalizace

V případě, že pro výrobu není vhodné žádné z výše uvedených kritérií, je možné použít jejich kombinaci. Nejčastěji je volen vhodný poměr minimálních výrobních nákladů a maximální produktivity [1].

2.5. Druhy omezení

Kritéria optimálnosti však nejsou jedinou limitující podmínkou pro správnou volbu řezných podmínek, resp. úspěšný návrh optimalizace výrobního procesu. Každý nástroj, stroj nebo výrobní úsek má svá omezení (své možnosti), která je nutné brát v úvahu. V minulosti byly tyto aspekty řešeny lineárním programováním, avšak v dnešní době je třeba brát v úvahu i jevy jako protočení vřetena (vlivy krouticího a ohybového momentu). V tom momentě se stává řešení nelineární. Kromě toho je nutné zahrnout i nespojitá omezení v podobě charakteristik obráběcích center [11].

Při matematickém vyjádření těchto omezení je třeba sestavit nerovnici, ve které bude na levé straně omezující veličina (všechny proměnné) a na straně pravé její maximální nebo minimální velikost [6].

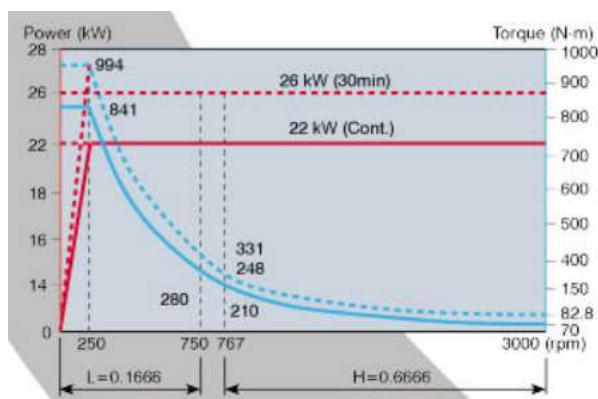
2.5.1. Výkon obráběcího stroje

Výkon obráběcího stroje je prioritním omezením, především při procesu hrubování, kdy je nutné docílit co možná největšího úběru materiálu. Při dokončovacích operacích je toto omezení nevýznamné. Maximální možnosti stroje a jejich doporučené využití je předepsáno výrobcem (viz. Obr. 2.5). Základním parametrem v tomto případě je tedy řezný výkon [14,18].

Řezný výkon [14]

$$P_c \leq P_e \cdot \eta \text{ [W]} \quad (2.4)$$

kde: $P_c \text{ [W]}$ je řezný výkon,
 $P_e \text{ [W]}$ je výkon elektromotoru stroje,
 $\eta \text{ [-]}$ je mechanická účinnost stroje.



Obr. 2.5 – Příklad obráběcího centra VTC-650 + Charakteristika výkonu [14].

2.5.2. Maximální přípustný krouticí moment

Krouticí moment na vřetenu stroje je možné vyjádřit na stejném principu jako u řezného výkonu. Hodnota maximálního krouticího momentu je lineární za předpokladu nízkých otáček vřetene (viz. Obr. 2.6 na následující straně). V případě, že obrábíme vysokými otáčkami, zvyšujeme odstředivou sílu a tím pádem se snižuje síla upínací. Tento efekt lze vyjádřit vztahem pro upínací sílu [11].

Krouticí moment na vřetenu [11]

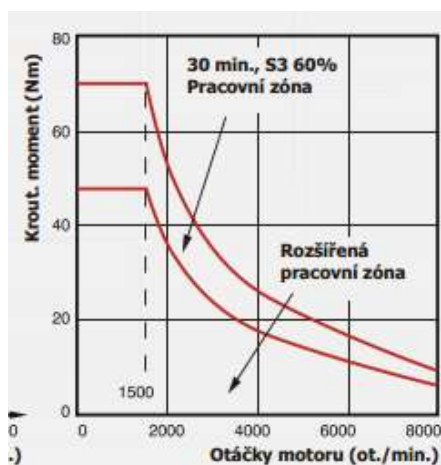
$$M_k = M_{ke} \cdot \eta \text{ [Nm]} \quad (2.5)$$

kde: M_k [Nm] je krouticí moment na vřetenu,
 M_{ke} [Nm] je maximální krouticí moment pohonu.

Upínací síla působící na čelisti [11]

$$F_u = F_{uo} - k_n \cdot n^2 \text{ [N]} \quad (2.6)$$

kde: F_u [N] je upínací síla působící na čelisti,
 F_{uo} [N] je upínací síla působící na čelist pro $n=0$,
 k_n [-] je konstanta udaná výrobcem stroje,
 n [min^{-1}] jsou otáčky vřetene.



Obr. 2.6 – Příklad obráběcího centra INAXES + charakteristika krouticího momentu [15].

2.5.3. Maximální přípustný ohybový moment

V případě, že je obrobek upnut pouze ve sklíčidle a tím pádem není pojištěn jiným způsobem, může dojít k jeho uvolnění ze sklíčidla. Ohybový moment na sklíčidle musí být opět menší než jeho dovolená mez [11].

Maximální ohybový moment na vřetenu [11]

$$M_{omax} = 0,75 \cdot \mu \cdot D_u \cdot F_{uo} \cdot 10^{-3} [Nm] \quad (2.7)$$

kde: M_{omax} [Nm] je maximální ohybový moment na vřetenu,
 μ [-] je koeficient tření na čelisti,
 D_u [mm] je průměr upnutí.

2.5.4. Maximálně přípustné síly

Stroj, nástroj, nebo obrobek jsou namáhány ve třech osách kartézského souřadného systému (x, y, z), což je způsobeno jejich omezenou tuhostí a pevností. V těchto osách působí kolmo na sebe řezná síla F_c , pasivní síla F_p a posuvová síla F_f . Jejich vyjádření lze provést na stejném principu [2].

Řezná síla [11]

$$F_c = k_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} \leq F_{cmax} [N] \quad (2.8)$$

kde: F_c [N] je řezná síla,
 F_{cmax} [N] je maximální řezná síla,
 k_{F_c} [-] je konstanta,
 x_{F_c} [-] je empirická konstanta,
 y_{F_c} [-] je empirická konstanta.

Pasivní síla [11]

$$F_p = k_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} \leq F_{pmax} [N] \quad (2.9)$$

kde: F_p [N] je pasivní síla,
 F_{pmax} [N] je maximální pasivní síla,
 k_{F_p} [-] je konstanta,
 x_{F_p} [-] je empirická konstanta,
 y_{F_p} [-] je empirická konstanta.

Posuvová síla [11]

$$F_f = k_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} \leq F_{fmax} [N] \quad (2.10)$$

kde: F_f [N] je posuvová síla,
 F_{fmax} [N] je maximální posuvová síla,
 k_{F_f} [-] je konstanta,
 x_{F_f} [-] je empirická konstanta,
 y_{F_f} [-] je empirická konstanta.

Výsledná síla [11]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} [N] \quad (2.11)$$

kde: F [N] je výsledná síla.

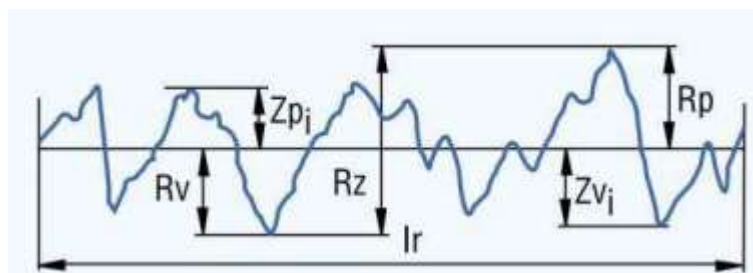
2.5.5. Vhodné utváření třísek

Ne vždy zajišťuje zvolená geometrie nástroje správné utváření třísky, což může vést k nežádoucím účinkům ve formě nekvalitního povrchu obrobku nebo dokonce zničení nástroje. Mezi varianty pro zabránění tohoto jevu můžeme zařadit změnu geometrie nástroje, změnu řezných podmínek nebo instalaci utvařeče třísky. Nevhodně se utvářející tříska, která se dostane zpět pod břit, může způsobit zničení břitu nebo zcela vyplnit prostor okolo nástroje, což znemožní jeho automatickou výměnu. Pro každý nástroj z určitého materiálu jsou vymezeny hranice maximálního a minimálního posuvu na otáčku a hloubky řezu, jejímž dodržením lze nevhodně odcházející třísky předejít. Hranice takto vymezené oblasti je dále ovlivněna řeznou rychlostí. Čím větší je řezná rychlost, tím se tato oblast zmenšuje a to zejména u vysokých posuvů na otáčku. Každému nástrojovému materiálu a řezné rychlosti tedy můžeme přiřadit jednu hranici této oblasti. Graf závislosti posuvu na otáčku na hloubce řezu by měl být znám od dodavatele nástroje. V opačném případě je nutné provést sérii experimentů a tento graf vypracovat [2].

2.5.6. Drsnost obrobené plochy

Obdobně jako u předešlých omezení musí být aritmetická úchylka drsnosti obrobeného povrchu menší nebo rovna než její dovolená mez. Tato hodnota je dále funkcí poloměru špičky nástroje [11].

Pro dosažení požadované funkčnosti, spolehlivosti a životnosti strojní součásti je nutné dodržení předepsané drsnosti povrchu. Ta nadále zajišťuje odolnost proti opotřebení, únavovou pevnost, přesnost a další. Drsnost je vznik nerovností na povrchu obrobené plochy. Pro její zjištění je nutná analýza profilu v rovině řezu, která je základním zdrojem informace. Pokud je rozteč mezi nerovnostmi povrchu velmi malá, mluvíme o drsnosti povrchu. V opačném případě se jedná o vlnitost nebo tvar obrobené plochy. Základní parametry jsou uvedeny na následujícím obrázku (viz. Obr. 2.7) [26].



kde: R_a [μm] je střední aritmetická výška nerovností,
 R_z [μm] je průměrná výška nerovností,
 R_p [μm] je největší výška výstupku profilu,
 R_v [μm] je největší hloubka prohlubně profilu,
 l_r [mm] je délka měření.

Obr. 2.7 – Základní parametry drsnosti povrchu [26].

Základní metody měření drsnosti povrchu jsou kvalitativní a kvantitativní. Kvalitativní metoda je porovnávací metoda, která využívá vzorkovnice (s drsností povrchu, kterou předem známe) a pomocí lidského faktoru je porovnáme s neznámým povrchem. V případě

nedostatečné rozlišovací schopnosti lidského oka lze využít mikroskopy. Takový mikroskop má dvě zorné pole. Jedno zobrazuje známý povrch a druhé neznámý. Při kolmém pohledu na vzorek nelze bezpečně rozeznat hloubka prohlubní profilu, a proto se využívá šikmého pohledu. Tyto metody mají spíše orientační charakter a pro přesné měření nejsou dostačující [26].

Závislost R_a na ostatních parametrech [11]

$$R_a = g(f, v_c, r, K_r, K_r', \dots) [\mu m] \quad (2.12)$$

kde: r [mm] je poloměr špičky nástroje,
 K_r [°] je úhel nastavení,
 K_r' [°] je jedlejší úhel nastavení.

Průměrná výška nerovností [5]

$$R_z = \frac{1}{5} \cdot \left(\sum_{i=1}^5 Z_{pi} + \sum_{i=1}^5 Z_{vi} \right) [\mu m] \quad (2.13)$$

kde: Z_p [μm] je výstupek profilu,
 Z_v [μm] je prohlubeň profilu.

Střední aritmetická výška nerovností [5]

$$R_a = \frac{1}{l_r} \cdot \int_0^{l_r} |y| dx [\mu m] \quad (2.14)$$

kde: Z_p [μm] je výstupek profilu,
 Z_v [μm] je prohlubeň profilu.

Střední kvadratická výška nerovností [5]

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} y^2(x) dx} [\mu m] \quad (2.15)$$

kde: R_q [μm] je střední kvadratická výška nerovností.

Střední rozteč nerovností [5]

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} [\mu m] \quad (2.16)$$

kde: S_m [μm] je střední rozteč nerovností.

Kvantitativní metody využívají měřících přístrojů, které jsou schopny výrazně přesněji definovat základní parametry drsnosti povrchu. Tyto přístroje mohou být dotykové nebo bezdotykové. Princip dotykových přístrojů spočívá v posouvání měřícího hrotu po povrchu a zaznamenává změny jeho výšky. Nejčastěji se používají přístroje s mechanickým převodem a induktivní nebo elektromagnetické přístroje. Přesnost těchto přístrojů je omezena poloměrem

špičky měřicího hrotu. Při měření navíc dochází k mechanickému poškození povrchu měřeného vzorku. Bezdotykové přístroje využívají promítání světelného paprsku na měřený povrch, který se následně odrazí zpět nebo rozptýlí. Výhoda této metody je nepoškozený povrch. Nevýhodou je skutečnost, že paprsek se nemusí odrazit zpátky do detektoru přístroje, což způsobuje nepřesné nebo nedokončené měření. Mezi další možnosti patří metody AFM a SEM. Metoda AFM (atomic force microscopy) využívá miniaturního hrotu, který je výškově vychylován pomocí piezoelektrického článku a meziatomární síly způsobené měřeným vzorkem. Metoda SEM (scanning electron microscopy) spočívá v proudění elektronů na měřený povrch, které se buď odrazí, nebo jsou pohlceny [26].

2.5.7. Taylorův vztah a výpočty parametrů soustružení

Taylorův vztah pro výpočet trvanlivosti nástroje je zcela odlišný od ostatních omezení, protože je zapsán jako rovnice. Zde neurčujeme maximální přípustnou hranici nějaké veličiny pomocí nerovnice, ale přesně definujeme již zmíněnou trvanlivost [11].

Taylorův vztah [11]

$$v_c = \frac{c_v}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v} \cdot T^{\frac{1}{m}}} [m/min] \quad (2.17)$$

kde: T [hod] je trvanlivost nástroje,
 x_v [-] je empirická konstanta,
 y_v [-] je empirická konstanta,
 c_v [-] je empirická konstanta,
 m [-] je empirická konstanta.

Operační výrobní náklady [30]

$$N_c = N_s + N_v + N_n [Kč] \quad (2.18)$$

kde: N_c [Kč] jsou operační výrobní náklady,
 N_s [Kč] jsou náklady na strojní práci,
 N_n [Kč] jsou náklady na nástroj a jeho výměnu.

Náklady na strojní práci [31]

$$N_s = t_{AS} \cdot N_{sm} [Kč] \quad (2.19)$$

kde: N_{sm} [Kč] jsou náklady na minutu strojní práce,
 t_{AS} [min] je jednotkový strojní čas.

Jednotkový strojní čas [31]

$$t_{AS} = \frac{L}{v_f} [min] \quad (2.20)$$

kde: L [mm] je dráha nástroje ve směru posuvu.

Dráha nástroje ve směru posuvu [31]

$$L = l_n + l + l_p [mm] \quad (2.21)$$

kde: L [mm] je dráha nástroje ve směru posuvu.
 l_n [mm] je délka náběhu,

l [mm] je délka soustružené plochy,
 l_p [mm] je délka přeběhu.

Náklady na vedlejší práci [31]

$$N_v = t_{AV} \cdot N_{vm} \text{ [Kč]} \quad (2.22)$$

kde: N_{vm} [Kč] jsou náklady na minutu vedlejší práce,
 t_{AV} [min] je jednotkový vedlejší čas,

Náklady na nástroj a jeho výměnu [31]

$$N_n = N_T \cdot z_v \text{ [Kč]} \quad (2.23)$$

kde: N_T [Kč] jsou náklady na nástroj a jeho výměnu,
 z_v [-] je počet výměn nástroje, vztážený na obrobek jednoho kusu.

Optimální trvanlivost nástroje [31]

$$T_{optN} = \frac{60 \cdot N_T}{D_s} \cdot (m - 1) \text{ [min]} \quad (2.24)$$

kde: T_{optN} [min] je optimální trvanlivost nástroje,
 N_T [Kč] jsou náklady na nástroj a jeho výměnu vztážené na jednu trvanlivost,
 D_s [Kč/hod] jsou náklady na hodinu strojní práce.

Výkon obráběcího stroje [31]

$$P_m = \frac{F_c \cdot v_c}{6 \cdot 10^4 \cdot \eta} \text{ [kW]} \quad (2.25)$$

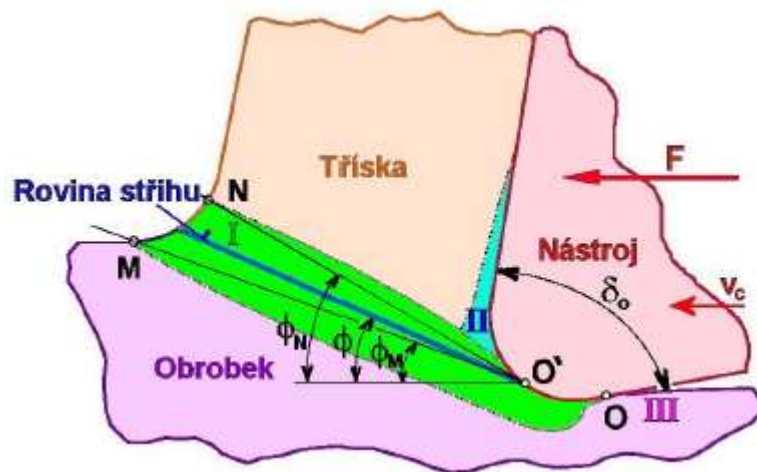
kde: P_m [kW] je výkon obráběcího stroje,
 η [-] je mechanická účinnost obráběcího stroje.

2.5.8. Organizační omezení

Organizační omezení jsou konkrétní pro každou firmu. Lze do nich zařadit například počet typových strojů, možnosti dílny, počet zaměstnanců údržby. Nejedná se zde o omezení technického charakteru [11].

2.6. Řezné prostředí

Pro docílení snížení teploty nástroje a snížení tření na stykových plochách jsou využívány chladicí kapaliny. Tyto kapaliny však mají vliv i na mechaniku tvoření třísky, silové jevy mezi nástrojem a obrobkem, deformaci, topografii obrobeneho povrchu, atd. Vyjma oblasti primární a sekundární deformace (viz. Obr. 2.8) vzniká deformace ještě v povrchové vrstvě plochy řezu. Tento jev je způsoben zaoblením ostří nástroje a nazývá se nárůstek. Ten však vzniká pouze za určitých teplot, a proto je možné ho eliminovat vhodným chlazením. Stabilní nárůstek má konstantní velikost, zatímco nestabilní se rozpadá. Rozpad má negativní vliv na drsnost obrobeneho povrchu a na opotřebení nástroje [1].



kde: I – je oblast primární deformace,
 II – je oblast sekundární deformace,
 III – je oblast terciální deformace.

Obr. 2.8 – Detail obrábění [30].

Rozsah a tvar oblasti primární deformace přímo ovlivňuje ostatní deformační oblasti, deformační práci, silové namáhání, opotřebení nástroje a řezné podmínky. Tato oblast způsobuje trhliny na vnější straně třísky a uvnitř třísky, které jsou navzájem spojené. Při vhodném řezném prostředí je vznik těchto trhlin příznivý a usnadňuje tak celý proces obrábění. To je možné ještě umocnit použitím řezné kapaliny, která na povrch třísky působí chemicky a snižuje tak přechovávání třísky. Zároveň zabraňuje vniknutí trhlin do obrobené plochy, což je nežádoucí jev [2].

Oblast sekundární plastické deformace se nachází na rozmezí vnitřní strany třísky a čela nástroje. Toto rozmezí může být buď plošné, nebo bodové. K bodovému styku dochází při nižších teplotách obrábění, naopak k plošnému styku dochází při vyšších teplotách obrábění. Faktory řezného prostředí mohou způsobit i kombinaci těchto stykových ploch, přičemž bodový styk vzniká vždy dále od špičky nástroje a za určitých podmínek se může rozšiřovat. Tento jev však má zanedbatelný efekt na opotřebení nástroje [2].

V dnešní době se řezná kapalina využívá téměř při každém obrábění (viz. Obr. 2.9). Každý proces vyžaduje individuální přístup a tím i složení řezné kapaliny. Podle potřeby použití je lze rozdělit na:

- Kapaliny s dobrým mazacím účinkem (Minerální řezné oleje)
- Kapaliny s dobrým mazacím a chladícím účinkem (Emulze z minerálních olejů)
- Kapaliny s dobrým chladícím účinkem (Roztoky na bázi vody)
- Ostatní kapaliny

Výběr vhodné řezné kapaliny stále více ovlivňují požadavky na ekologii, které jsou v každé zemi předepsány více či méně rozdílně. Z tohoto důvodu je kladen značný důraz na vývoj alternativních řezných kapalin, které nejsou na bázi ropy. Dále by měly obsahovat jen minimální stopy chlóru, síry a fosforu. Náklady na tyto kapaliny mohou být i řádově vyšší než u klasických kapalin, jejich likvidace je však jednodušší a levnější. Mezi nejpoužívanější patří například modifikované rostlinné estery [11].



Obr. 2.9 – Příklady aplikace řezných kapalin firmy SANDVIK [17].

2.7. Lineární programování

Tato metoda je v praxi nejčastěji využívána z důvodu univerzálního použití pro řešení téměř jakékoli úlohy. Prvním krokem je sestavení statického matematického modelu, definujícího daný problém. Tento model musí zahrnovat věcný význam a počet proměnných, omezení problému a kritéria, která budeme uvažovat. Cílem této metody je určení lokálního nebo globálního extrému účelové funkce. Při hledání minima je tato metoda minimalizační, v opačném případě maximalizační. Takovéto výpočty jsou náročné z hlediska počtu proměnných, který může být v řádech desítek i stovek, proto je výhodné využít grafického znázornění, přičemž je toto znázornění n -rozměrném prostoru s „ n “ proměnnými [16].

3. EXPERIMENTÁLNÍ VERIFIKACE

3.1. Popis experimentu

Pro tento experiment bylo vybráno obrábění Lícovaného šroubu M80x4 (viz. Obr. 3.1). Obrábění bylo realizováno na číslicově řízeném soustruhu S80i od firmy KOVOSVIT MAS, a.s. Lícovaný šroub je součástí soustrojí Francisovy turbíny pro švédského zákazníka, konkrétně slouží jako hlavní spojovací materiál mezi turbínovou hřídelí a mezhřídelí. Během obrábění byly zaznamenány řezné podmínky, parametry stroje a nástrojů a parametry obráběného materiálu s cílem optimalizovat řezné podmínky, prověřit volbu nástrojů a technologický postup.



Obr. 3.1 – Upnutá obráběná součást.

3.2. Obráběcí stroj MAS S80i

Tento číslicově řízený soustruh je konstruován s cílem zajistit bezpečnost a pohodlí obsluhy, šetrnost k životnímu prostředí a minimalizovat technologickou a časovou náročnost údržby. Stroj je konstruován dle bezpečnostních norem a předpisů EU a zákonů České republiky. Z pohledu výroby je vhodný pro kusovou, malosériovou a sériovou výrobu rotačních kulových a válcových ploch (hřídele, příruby, atd.) a řezání závitů v ose vřetena. Veškeré tyto úkony jsou realizovány pomocí CNC řídicího systému. Vřeteno je poháněno dvoustupňovou integrovanou převodovkou. Posuvy jsou poháněny střídavými regulačními servopohony. Polohovací nástrojová hlava umožňuje využití 12-ti nástrojů bez nutnosti jejich střídavého upínání. Osa této nástrojové hlavy je rovnoběžná s osou hlavního vřetena. Pro případ obrábění dlouhých obrobků je stroj vybaven koníkem, jehož přestavování se provádí ručně pomocí šroubu. Vysunutí pinoly je ovládáno již zmíněným CNC řídicím systémem. Z důvodu bezpečnosti obsluhy je stroj vybaven kompletně zakrytým pracovním prostorem, chlazením a automatickým dopravníkem třísek. Stroj je konstruován do strojírenského provozu s mírnými klimatickými podmínkami a do objektů s přirozeným větráním. Vyžaduje také nízkou prašnost. Okolní teplota je doporučena výrobcem v rozmezí od 10 [°C] do 35 [°C] a doporučená maximální vlhkost vzduchu je 80 %. Dále nesmí být stroj umístěn v přílišné blízkosti strojů, které způsobují velké vibrace a otřesy (buchary, lisy, atd.) [19].

3.2.1. Technické údaje

Základní technické údaje jsou zaznamenány v následující tabulce (viz. Tab. 3.1) a stroj je vyobrazen pod tabulkou (viz. Obr. 3.2).

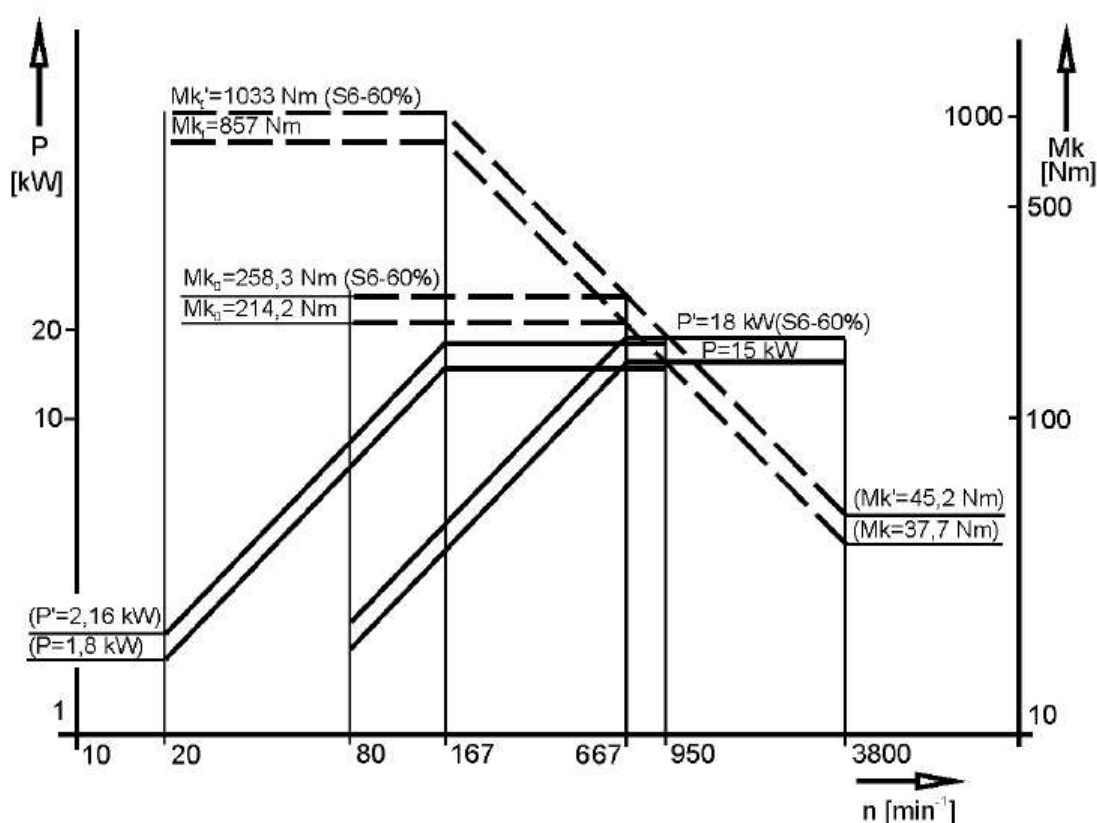
Tab. 3.1 – Technické údaje [19].

PARAMETR	HODNOTA
Vřeteno	
Průměr vřetena	140 [mm]
Výkon	20,5 [kW]
Maximální otáčky	3800 [ot./min]
Maximální kroutící moment	1033 [Nm]
Support	
Maximální pojezd v ose Z	1105 [mm]
Maximální pojezd příčného supportu v ose X	295 [mm]
Rychlost podélného a příčného rychloposuvu	24 [m/min]
Maximální rozměry obrobku	
Oběžný průměr	680 [mm]
Průměr obrobku	465 [mm]
Délka obrobku s použitím koníku	1000 [mm]



Obr. 3.2 – Soustruh MAS S80i [19].

Stroj je vybaven hydraulickým agregátem HAWE jehož pracovní tlak dosahuje hodnoty 50 [bar], výkon motoru je 2,2 [kW] a objem nádrže 9 [l]. Mazací agregát GMK 3092 LMP je dodán italským dodavatelem TECHNOSYSTEMS. Pracovní tlak čerpadla je 28 [bar] a objem nádrže pro mazivo je 3 [l]. Agregát pracuje v mazacím intervalu 10 až 15 [min]. Nástrojová hlava BSV-N-250 umožňuje upnutí až 12-ti nástrojů. Výkonová a momentová charakteristika stroje je vyobrazena v následujícím obrázku (viz. Obr. 3.3) [19].



Obr. 3.3 – Výkonová a momentová charakteristika [19].

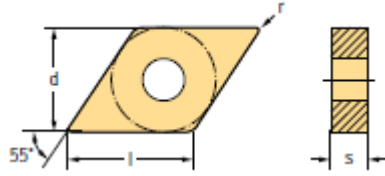
3.3. Nástroje

Pro hrubování i obrábění na čisto byly použity nástroje od firmy Walter, která se specializuje na výrobu nástrojů s vyměnitelnou břitovou destičkou. Tato firma klade velký důraz na inovaci a proto až 70 % nástrojů nemá starší technologii než 5 let. Mezi její sortiment patří nástroje pro soustružení, frézování i řezání závitů. Dále se specializuje na vývoj nástrojů Titex. Jedná se o monolitní vrtáky z rychlořezné oceli HSS nebo slinutého karbidu. Moderní technologie se odráží v nástrojích Walter Prototype, které představují flexibilní řešení zejména v oblasti frézování a řezání závitů. Mezi materiály, které je možné obrábět, patří oceli, korozivzdorné oceli, litiny, titan, termoplasty a mnoho dalších. Díky pákovému upínání nástrojů je zabezpečen bezproblémový odvod třísky a to i pro destičky s negativní geometrií. Destička je vždy upevněna jedním šroubem pro snadnou manipulaci a to buď normální, nebo obrácené poloze. Tyto nástroje nacházejí uplatnění především v energetickém, leteckém a kosmonautickém průmyslu. Jejich značení odpovídá značení podle ISO 1832 pro soustružení [20,21].

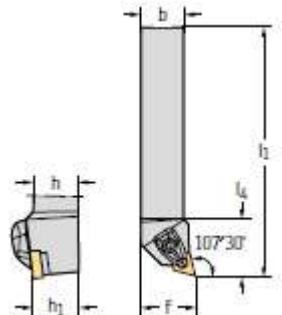
3.3.1. Hrubování

Pro hrubování byl zvolen nůž s označením DDHNL2525M15 (viz. Obr. 3.3) a vyměnitelná břitová destička s označením DNMG150608L-K (viz. Tab. 3.2) [21].

Tab. 3.2 – Parametry a náčrt VBD [21].

DNMG150608L-K	d [mm]	l [mm]	s [mm]	r [mm]	f [mm/ot.]	v_c [m/min]
	12,7	15,5	6,35	0,8	0,14 ÷ 0,50	110 ÷ 170

Tab. 3.3 – Parametry a náčrt držáku [21].

DDHNL2525M15	h [mm]	b [mm]	f [mm]	l_1 [mm]	l_4 [mm]	γ [°]	λ_s [°]
	25	25	32	150	36,1	-6	-7

Zvolený soustružnický nůž a VBD jsou vhodné pro podélné a čelní soustružení, tvarové soustružení, vybírání a přerušované řezy. Dále pro obrábění oceli, nerezové oceli, litiny, těžko obrobitelné materiály a tvrdé materiály. VBD je připevněna k noži pomocí upínky. Na obrázku je zachycen stav nože po obrábění (viz. Obr. 3.4) [21].

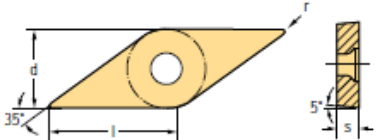


Obr. 3.4 – Vybraný soustružnický nůž pro hrubování.

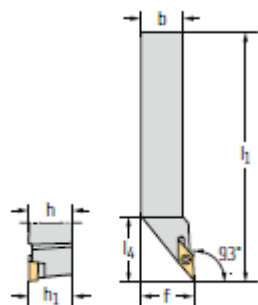
3.3.2. Dokončování

Pro obrábění na čisto byl zvolen soustružnický nůž s označením SVJBL2525M16 (viz. Tab. 3.5) a vyměnitelná břitová destička s označením VCMT160404-PF4 (viz. Tab. 3.4) [21].

Tab. 3.4 – Parametry a náčrt VBD [21].

VCMT160404-PF4	d [mm]	l [mm]	s [mm]	r [mm]	f [mm/ot.]	v_c [m/min]
	9,525	16,6	4,76	0,4	0,15 ÷ 0,20	0,1 ÷ 1,5

Tab. 3.5 – Parametry a náčrt držáku [21].

SVJBL2525M16	h [mm]	b [mm]	f [mm]	l_1 [mm]	l_4 [mm]	γ [°]	λ_s [°]
	25	25	32	150	31,5	0	0

Zvolený soustružnický nůž a VBD (viz. Obr. 3.5) jsou vhodné pro podélné a čelní soustružení, vybírání a přerušované řezy. Dále jsou výrobcem doporučené pro obrábění ocelí, nerezových ocelí, litin, neželezných kovů a těžko obrobitelných materiálů. Jejich použití pro tvrdé materiály je možné, ale dodavatelem ne přímo doporučené. VBD je připevněna k držáku šroubovitým upínáním, což pro obsluhu soustruhu znamená její jednodušší výměnu [21].

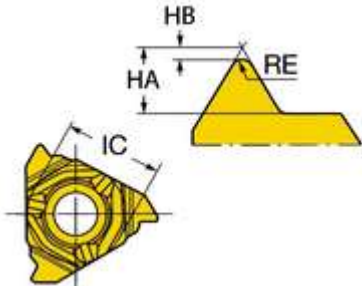


Obr. 3.5 – Vybraný soustružnický nůž pro dokončovací operace.

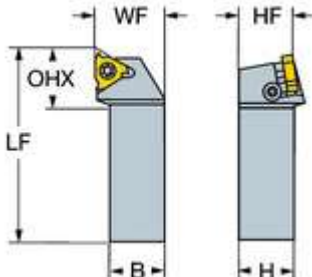
3.3.3. Řezání závitu M80x4

Pro řezání závitu M80x40 byl zvolen nůž s označením 266LFG-3232-22 (viz. Tab. 3.7) a vyměnitelná břitová destička s označením 266LG-22VM01A001M 1125 (viz. Tab. 3.6) [27].

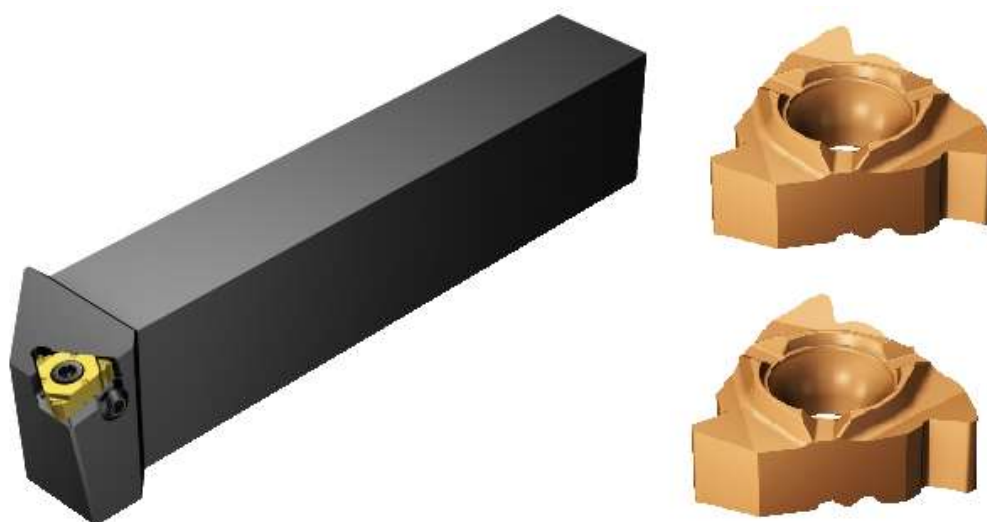
Tab. 3.6 – Parametry a náčrt VBD [27].

266LG-22VM01A001M 1125	IC [mm]	HA [mm]	HB [mm]	RE [mm]	v_c [m/min]
	12,7	4,92	0,48	0,48	90 ÷ 160

Tab. 3.7 – Parametry a náčrt držáku [27].

266LFG-3232-22	H [mm]	B [mm]	WF [mm]	HF [mm]	LF [mm]	OHX
	32	32	40	32	170	34,3

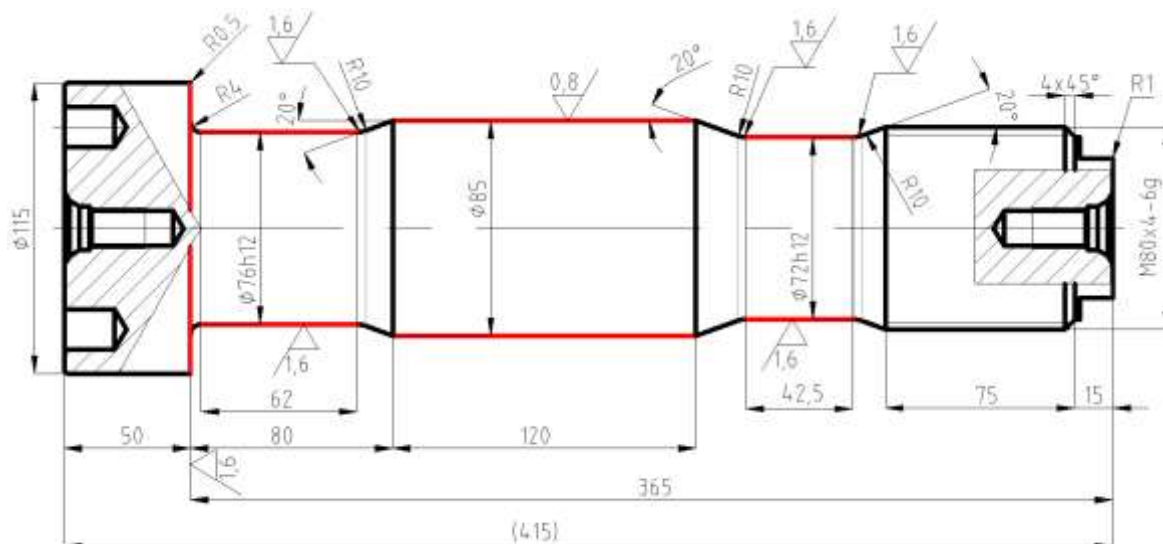
Zvolený soustružnický nůž a VBD (viz. Obr. 3.6) je všestranný závitořezný nástroj. Vyměnitelná břitová destička je ustavena na podložce pomocí stabilizačního vedení, což zaručuje přesnost obrábění a vysokou stabilitu [27].



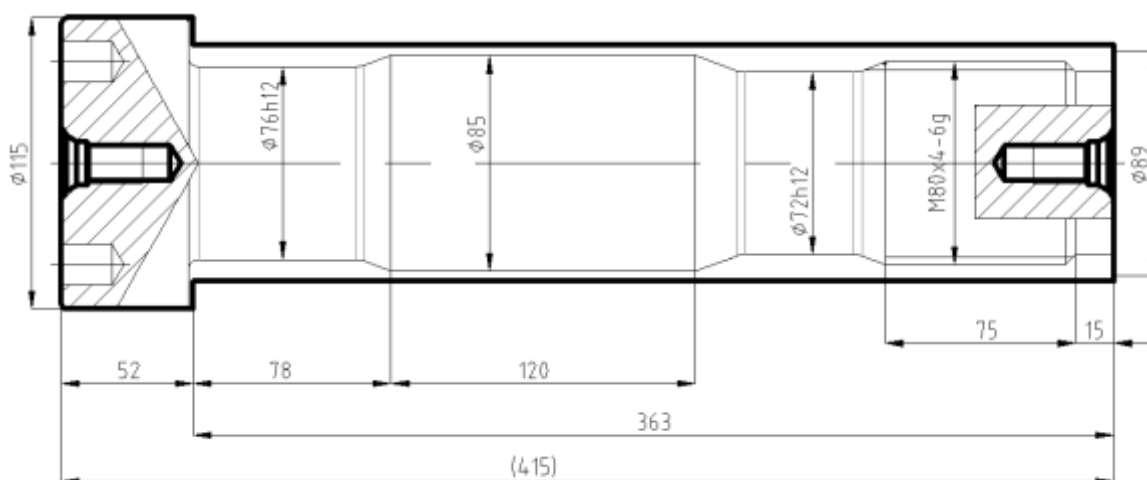
Obr. 3.6 – Vybraný soustružnický nůž pro řezání závitu M80x4 [27].

3.4. Obráběná součást

Pro tento experiment byl vybrán Lícovaný šroub M80x4 (viz. Obr. 3.7). Pokus byl proveden ve firmě zabývající se energetickým průmyslem a již zmíněný šroub slouží jako spojovací materiál mezi turbínovou hřídelí a mezhřídelí Francisovy turbíny. Celkem bude vyráběno 24 kusů.



Obr. 3.7 – Náčrt součásti.



Obr. 3.8 – Předhrubovaný polotovár na konvenčním soustruhu.

Šroub je vyrobený z materiálu 42CrMo4+QT a rozměry jeho polotovaru jsou KR120UT-430 (viz. Obr. 3.8). Polotovár odpovídá rozměrové normě ČSN EN 10060 a technické dodací podmínky jsou dle ČSN EN 10083-3. Ještě před dodáním polotovaru byly provedeny zkoušky požadované pracovníkem konstrukce. Jedná se o rozbor chemického složení, zkoušku tahem, zkoušku vrubové houževnatosti, zkoušku tvrdosti a zkoušku ultrazvukem dle ČSN EN 10228-3, klasifikační stupeň 3. Tyto zkoušky od dodavatele jsou doloženy inspekčním certifikátem 3.1 schváleným pracovníkem vstupní kontroly (viz. Příloha č. 1). Při obrábění na soustruhu MAS S80i byly dle technologického postupu sledovány tři válcové plochy a jedna čelní. Všechny jsou vyznačeny na náčrtu součásti červenou barvou. Válcové plochy ($\phi 76h12$, $\phi 72h12$ s drsností povrchu $Ra 1,6$ a $\phi 85$ s drsností povrchu $0,8$) byly na tomto stroji hrubovány s přídavkem a dokončovací operace byly provedeny na brusce na kulato. Čelní plocha na $\phi 115$ byla obrobena na čisto. $\phi 85$ byl ponechán s větším přídavkem a jeho finální přesný rozměr určil pracovník kontroly kvality na základě odměření děr svrtané turbínové

hřídele a mezhřídele. Po finálním opracování byla provedena magnetická polévací zkouška dle ČSN EN 10228-1, klasifikační stupeň 3. Stav dodaného polotovaru a stav po obrábění na soustruhu MAS S80i jsou zaznamenány na následujících fotografiích (viz. Obr. 3.9).



Obr. 3.9 – Stav dodaného polotovaru (vlevo) a stav po obrobení na soustruhu MAS S80i (vpravo).

3.4.1. Materiál polotovaru a jeho vlastnosti

Lícovaný šroub je vyroben z oceli 42CrMo4-QT (1.7225). Jedná se o nízkolegovanou chrom – molybdenovou ocel určenou k zušlechťování. Tato ocel má vyšší prokalitelnost pro namáhané strojní součásti. Po provedení operace kalení dosahuje její hodnota tvrdosti povrchu cca 58 HRC. Pokud je průměr kulatiny do 100 mm, můžeme po zušlechťování docílit meze pevnosti až 1000 MPa se zachováním vyhovující houževnatosti. Tato ocel nemá náchylnost k popouštěcí křehkosti. Naopak je náchylná ke vzniku kalících trhlin v místě s vrubovým účinkem nebo v místě povrchových vad a proto se kalí v méně razantním prostředí. Proces kalení dokáže zajistit odolnost vůči opotřebení. U ocelí pro zušlechťování se řadí mezi nejpoužívanější. Ocel je vhodná pro téměř všechny druhy kalení a to v rozmezí od 850 °C do 1100 °C. Tyto parametry jsou doporučené s výjimkou kalení čela (tzv. zkoušky prokalitelnosti). Již výše zmíněná náchylnost ke kalícím trhlinám omezuje kalící prostředí na použití syntetických polymerů nebo olejů. V případě hřídelů s větším průměrem, zejména kovaných polotovarů, se doporučuje provést normalizační žíhání ještě před zušlechtěním. Dobrou obrobitelnost tohoto materiálu lze podpořit obráběním ve stavu po žíhání na měkko, ale i po zušlechtění. V případě potřeby ještě lepší obrobitelnosti se doporučuje použití materiálu 42CrMoS4 se zvýšeným obsahem síry. Tyto polotovary se hrubují v žíhaném stavu a dokončují až po zušlechtění. Pro potřeby tvrdosti vhodné pro stříhání musíme tuto ocel žíhat nebo řízeně vychlazovat. Mechanické a fyzikální vlastnosti této oceli jsou uvedeny v tabulce na straně 38 (viz. Tab. 3.8 na následující straně), chemické složení je uvedeno na téže straně (viz. Tab. 3.9 na následující straně) [23].

Tab. 3.8 – Mechanické vlastnosti oceli 42CrMo4 [23].

Vlastnost	Zkratka	Hodnota	Jednotka
Minimální mez kluzu	Re	550	[MPa]
Pevnost v tahu	Rm	800 až 950	[MPa]
Tažnost	A	13	[%]
Tvrdost dle Brinella	HB	240 až 290	[-]
Vrubová houževnatost	KV	35	[J]

Tab. 3.9 – Chemické složení oceli 42CrMo4 [23].

Prvek	C	Si max.	Mn	P max.	S max.	Cr	Mo
Hmot. %	0,38 ÷ 0,45	0,40	0,60 ÷ 0,90	0,025	0,035	0,90 ÷ 1,20	0,15 ÷ 0,30

3.4.2. Technologický postup výroby dle dokumentace firmy

- 1) Provést vstupní kontrolu a připravit materiál do výroby
- 2) Hrubovat s přídavkem 2 mm na plochu na konvenčním soustruhu
- 3) Kontrola tvrdosti a magnetická zkouška dle ČSN EN 10228-1
- 4) Očistit a odmastit
- 5) Obrábění na čisto a hrubování ploch pro broušení s přídavkem 0,45 mm na číslicově řízeném soustruhu MAS S80i
- 6) Kontrola tvrdosti na plochách s Ra 1,6, vizuální a rozměrová kontrola
- 7) Očistit a odmastit
- 8) Rýsovat pro frézování a vrtání
- 9) Frézovat plochy na čele
- 10) Vrtat otvory ø16H12
- 11) Odjehlít vrtané a frézované hrany
- 12) Rozměrová a vizuální kontrola, leštění rádiusů dle výkresu
- 13) Následující operace provádět po sestružení turbínové hřídele a mezihřídele
- 14) Určit přesný rozměr na ø85 pro broušení – 6 ks
- 15) Soustružit ø85 s přídavkem pro broušení – 6 ks
- 16) Zbylé hřídele (18 ks) konzervovat a uložit do palety
- 17) Provést magnetickou zkoušku na ø85 a brousit na finální rozměr
- 18) Konečná rozměrová a vizuální kontrola, kontrola drsnosti
- 19) Konzervovat dle nátěrové specifikace očistit a uložit do palety pro montáž
- 20) Rozměry pro zbylých 18 lícovaných šroubů budou odměřeny a montáži a dokončeny při finálním ustavení hřídelů dle kroků 14) a 15)

3.5. Měření drsnosti povrchu

3.5.1. Měřicí přístroj

Pro kontrolu drsnosti obrobeneho povrchu byl zvolen přístroj na měření drsnosti povrchu SJ-301 od firmy Mitutoyo (viz. Obr. 3.10 a Tab. 3.10) [24].



Obr. 3.10 – Přístroj na měření drsnosti povrchu Mitutoyo SJ-301 [24].

Tento přístroj je ideálním řešením pro mobilní měření ve výrobním prostředí. Velký a čitelný dotykově ovládaný displej podporuje vestavěná tiskárna s kompletními hodnotami měření a grafem měřeného povrchu. Měření tohoto přístroje odpovídá nefiltrovanému profilu drsnosti dle DIN EN ISO 3274 a odfiltrovanému profilu drsnosti dle DIN EN ISO 4287. V případě měření ve stísněných prostorech je přístroj vybaven výměnnou posuvovou jednotkou. Výstupem je až 37 parametrů, z nichž je možné zobrazit 10 podle předešlé volby. Přístroj dokáže pracovat v teplotách od 5 °C do 40 °C a při relativní vlhkosti vzduchu max. 80 %. Na jedno nabití lze provést až 800 měření [24,25].

Tab. 3.10 – Technické parametry přístroje [24].

Parametr přístroje	Hodnota
Snímací metoda	Diferenciální indukční metoda
Měřicí rozsah	300 [μm]
Materiál doteku	Diamant
Poloměr snímacího hrotu	5 [μm]
Měřicí síla	4 [mN]
Poloměr snímací patky	40 [μm]
Rozsah posuvu snímače	21 [mm]
Rychlosti posuvu	0,25 [mm/s], 0,5 [mm/s]

3.5.2. Popis měření a naměřené výsledky

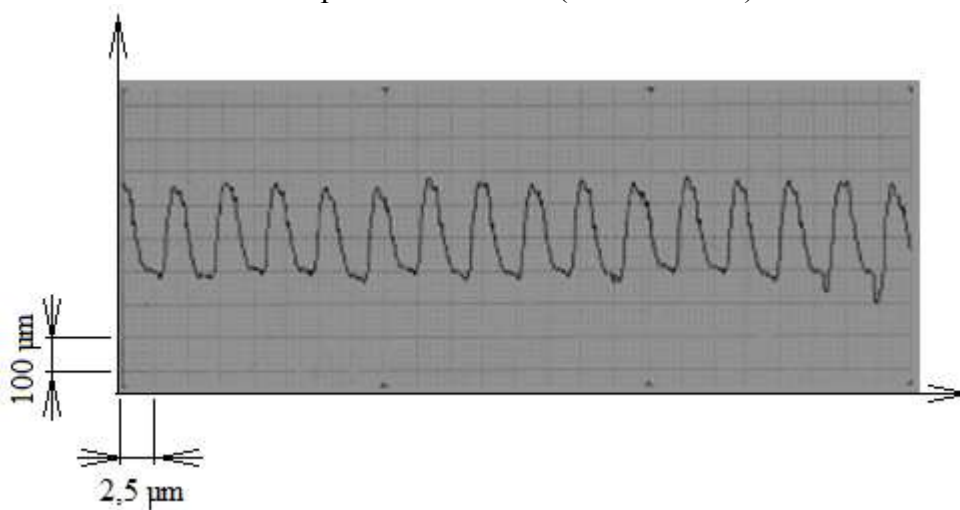
Výše zmíněným měřicím přístrojem bylo provedeno měření celkem na třech válcových ohrubovaných plochách a jedné čelní ploše obrobene na čisto. Tyto plochy jsou vyznačeny na Obr. 3.7 na straně 36. Přístroj byl nejdříve zkalibrován pomocí kalibračního vzorku s drsností

Ra 3.0 a následně bylo provedeno měření (viz. Obr. 3.12). Výsledná hodnota kalibrace byla Ra 2,96.



Obr. 3.11 – Měření drsnosti (vlevo nahoře – kalibrace, vpravo nahoře – Plocha č. 3, dole – Plocha č. 4).

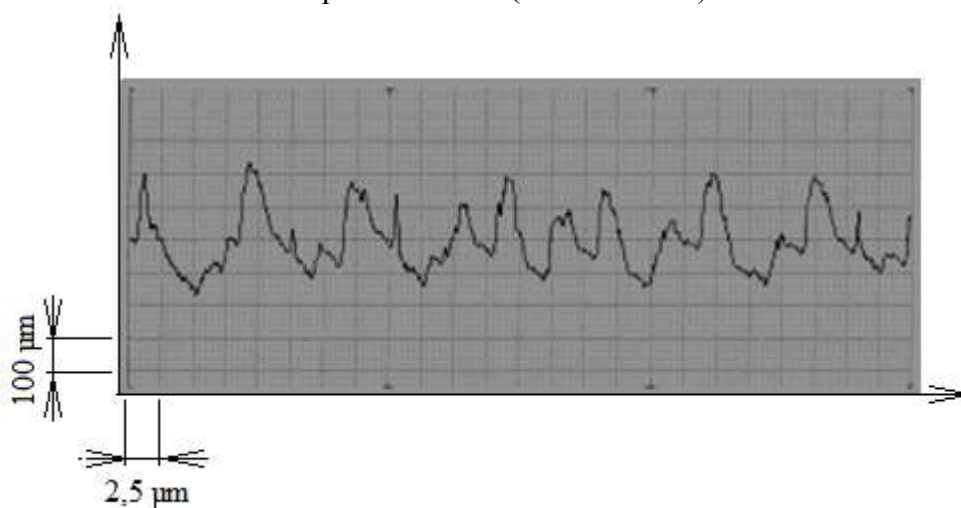
Plocha č. 1 – Válcová hrubovaná plocha na $\varnothing 76h12$ (viz. Obr. 3.13)



Obr. 3.12 – Záznam měření plochy č. 1.

Výsledky měření: Ra = 2,43 [μm]
 Rz = 8,42 [μm]
 Rq = 2,66 [μm]

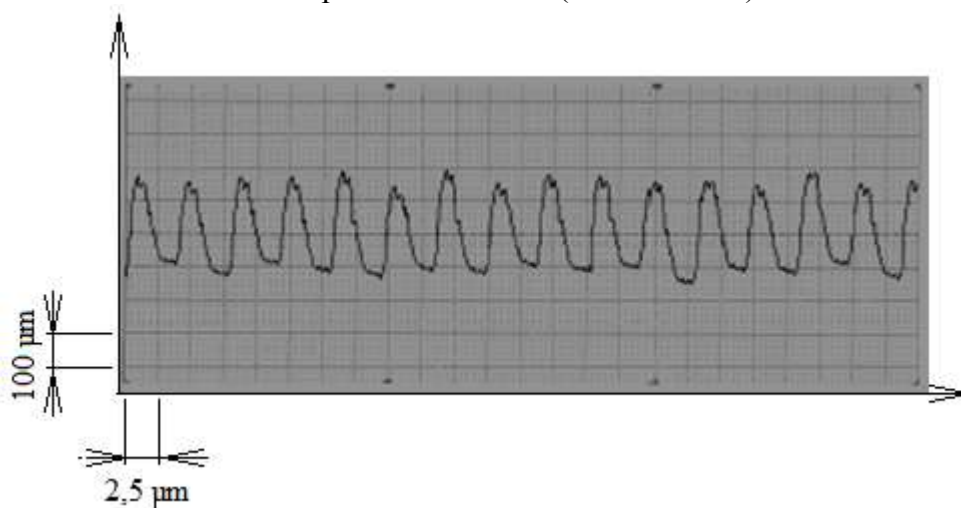
Plocha č. 2 – Válcová hrubovaná plocha na $\varnothing 85$ (viz. Obr. 3.14)



Obr. 3.13 – Záznam měření plochy č. 2.

Výsledky měření: $R_a = 1,80 \text{ } [\mu\text{m}]$
 $R_z = 9,01 \text{ } [\mu\text{m}]$
 $R_q = 2,22 \text{ } [\mu\text{m}]$

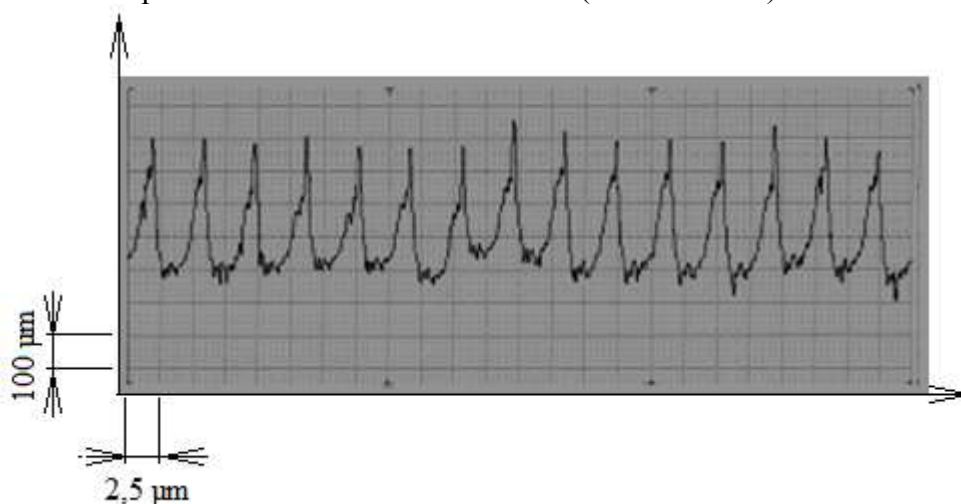
Plocha č. 3 – Válcová hrubovaná plocha na $\varnothing 72\text{h}12$ (viz. Obr. 3.15)



Obr. 3.14 – Záznam měření plochy č. 3.

Výsledky měření: $R_a = 2,40 \text{ } [\mu\text{m}]$
 $R_z = 8,10 \text{ } [\mu\text{m}]$
 $R_q = 2,63 \text{ } [\mu\text{m}]$

Plocha č. 4 – Čelní plocha obrobená na čisto na $\varnothing 115$ (viz. Obr. 3.16)



Obr. 3.15 – Záznam měření plochy č. 4.

Výsledky měření: $R_a = 0,97 \text{ } [\mu\text{m}]$
 $R_z = 4,94 \text{ } [\mu\text{m}]$
 $R_q = 1,15 \text{ } [\mu\text{m}]$

V případě ploch č. 1, 2, 3 jde o proces hrubování pro následné broušení, kde je dle normy ČSN 014975 požadovaná drsnost povrchu $R_a = 3,2$. Pro optimalizaci tohoto procesu navrhuji prověřit technologický postup a vyhodnotit, zda je nutné povrchy č. 1 a 3 pouze hrubovat a finální obrobení realizovat na brusce. Požadovaný povrch $R_a 1,6$ není na soustruhu MAS S80i nedosažitelný. Povrch č. 2 má požadovanou drsnost $R_a 0,8$, která dle výše uvedené normy vyžaduje stejnou drsnost při hrubování a taktéž je možné tento povrch dokončit přímo na CNC soustruhu. Tyto změny mohou ovlivnit náklady na manipulaci a upínání obrobku. Dále mohou nastat rozdíly v hodinové sazbě CNC soustruhu a brusky na kulato. Výsledná drsnost povrchu č. 4 je výrazně nižší než drsnost požadovaná ($R_a 0,97 < R_a 1,6$), což naznačuje optimální volbu řezných podmínek. Tento povrch však bude také přebroušen z důvodu zachování házivosti přesně obrobených válcových ploch v závislosti na čele (plocha č. 4). Výsledné hodnoty jsou znázorněny v následující tabulce (viz. Tab. 3.11).

Tab. 3.11 – Porovnání výsledných hodnot.

Měřená plocha	Výsledek měření hodnoty $R_a \text{ } [\mu\text{m}]$	Požadovaná hodnota $R_a \text{ } [\mu\text{m}]$
Plocha č. 1	2,43	3,2
Plocha č. 2	1,8	
Plocha č. 3	2,4	
Plocha č. 4	0,97	1,6

3.6. Řezné podmínky

Řezné podmínky byly zvoleny pracovníkem technologické přípravy výroby a programátorem CNC strojů. Ze soustruhu byl pomocí USB portu stažen program na výrobu tohoto dílu (viz. níže). Výrobce doporučené parametry byly uvedeny na obalu VBD a zaznamenány přímo na dílně (viz. Tab. 3.12 na následující straně).

Tab. 3.12 – Porovnání řezných podmínek.

Operace	Zvolené parametry		Výrobce doporučené parametry		
	f [mm/ot.]	v _c [m/min]	f [mm/ot.]	v _c [m/min]	a _p [mm]
Hrubování	0,3	120	0,14 ÷ 0,5	110 ÷ 170	0,8 ÷ 5
Dokončování	0,15	140	0,15 ÷ 0,20	80 ÷ 165	0,2 ÷ 0,4
Řezání závitu	0,2	120		90 ÷ 160	

Část programu stažená z operačního systému soustruhu MAS S80i

REVOLVER 1 [OTOCNA HLAVA]

T 4 ID"CEL_TRIGON"

T 2 ID"2_DOK."

T 6 ID"NUZ_35_STUPNU"

T 8 ID"ZAV_4"

T 12 ID"HRUB_VNIRNI"

BEARBEITUNG [OBRABENI]

N 249 G26 S900

N 250 G14 Q0

N 251 T2 (Příkaz pro revolverovou hlavu – Nástroj pro hrubování)

N 252 G95 F0.3 G96 S120 M4 M8 (G95 – posuv na otáčku, G96 - řezná rychlost)

N 253 G0 X95 Z5

N 289 G810 NS301 NE287 P2.5 I1 K0.2 X69 Z-367

N 290 G14 Q0

N 1 T6 (Příkaz pro revolverovou hlavu – Nástroj pro dokončování)

N 291 G96 S140 G95 F0.15 (G95 – posuv na otáčku, G96 - řezná rychlost)

N 292 G0 X95 Z5

N 293 G890 NS301 NE287 X69 Z-367

N 294 G14 Q0

N 302 G26 S350

N 296 T8 (Příkaz pro revolverovou hlavu – Nástroj pro závity)

N 298 G96 S120 G95 F0.2 (G95 – posuv na otáčku, G96 - řezná rychlost)

N 297 G0 X95 Z5

N 299 G31 NS279 I0.06 B17 P7 D1 H3

N 300 G14 Q0

N 24 M9 M61 M5

N 25 M30

ENDE [KONEC]

3.7. Výsledek experimentu a návrh optimalizace

Dle výsledků měření byly všechny měřené plochy s vyhovující drsností. Plocha č. 4 měla drsnost menší o 0,6 μm. Plochy č. 1 až 3 splnily požadovanou drsnost pro přídavek na broušení. Finální povrch byl dle technologického postupu plánován na brusku na kulato. U ploch č. 1 až 3 je požadovaná drsnost Ra 1,6, což je vyrobitelné rovnou na soustruhu MAS S80i. Na základě těchto závěrů, lze rozhodnout, že úspora ve vedlejších časech (manipulace mezi soustruhem a brusku, prostoje, balení do palety, ustavení na stroji, atd.) může v nemalé míře ovlivnit celkové náklady na výrobu a časovou náročnost výroby. Rozdíl dále nastává při hodinových sazbách obou pracovišť (viz. Tab. 3.13 na následující straně). Při procesu hrubování byla použita hodnota posuvu na minimální možné úrovni (0,15 mm/ot. v doporučeném rozsahu 0,15 ÷ 0,20 mm/ot.). Zvolený parametr sice vyhovuje doporučenému

rozsahu, ale jeho hodnota na hranici minimální hodnoty může mít vliv na trvanlivost nástroje a na pravděpodobnost vzniku poškození nebo deformace nástroje.

Tab. 3.13 – Kalkulace pro obráběcí pracoviště.

Pracoviště	Mzdový tarif [Kč/hod]	Výrobní režie [Kč/hod]	Správní režie [Kč/hod]	Úplné vlastní náklady [Kč/hod]
Bruska BHU 32/1000	272	450	385	1112
Soustruh MAS S80i	207	343	294	844

3.7.1. Varianty výroby

Po provedení předešlých měření a zjištění informací o průběhu výroby této součásti lze navrhnout dvě možné varianty výroby.

Variant A

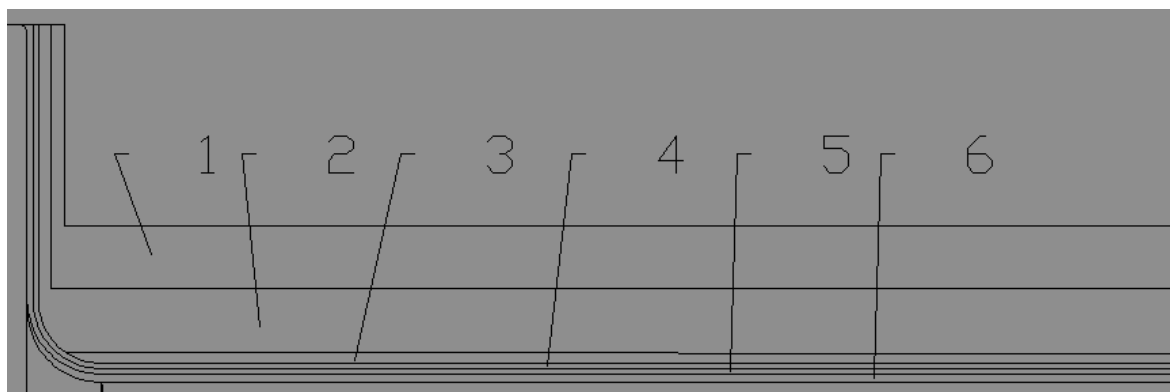
Tato varianta byla navržena pracovníky technologické přípravy výroby a byla zrealizována. Jedná se o hrubování a dokončovací operace provedené na soustruhu MAS S80i a následné dokončení válcových ploch na brusce na kulato. Přičemž přídavek na broušení je dle normy ČSN 014975 zvolen 0,45 mm a to pro plochy č. 1 a 3. Pro plochu č. 2 by tento přídavek byl totožný, ale kvůli technologickému postupu je zvolen na 2 mm. Polotovar dodaný do firmy byl předhrubován na konvenčním soustruhu s přídavkem 2 mm na plochu, přičemž vnitřní otvory v ose šroubu, obě dvě čela a průměr 115 byly obrobena na hotovo. Finální rozměr plochy č. 2 bude proměřen až na montáži u zákazníka a proto v této chvíli není možné určit jeho velikost. V případě nutnosti velkého úběru materiálu bude lícovaný šroub ještě ohrubován na konvenčním soustruhu a až poté bude provedeno broušení na brusce na kulato.

Broušení ploch č. 1 a 3 bylo provedeno na konvenční brusce na kulato, proto nebylo možné obrobit zkosené hrany a rádiusy pomocí programu. Pro každou plochu zvlášť byl upraven brusný kotouč, který měl zkosené hrany a rádiusy totožné s finálním tvarem povrchu šroubu. Takto upravené brusné kotouče měli menší šířku než je šířka ploch na šroubu. Proto se plochy musely tzv. rozjíždět do stran a nebylo možné je vyrobit pouhým upíchnutím.

Variant B

Tato varianta uvažuje stejný počáteční postup, a to předhrubování na konvenčním soustruhu stejně jako v předešlé variantě a v technologickém postupu. Při obrábění jedné hrubovací třísky a jedné dokončovací třísky na CNC soustruhu MAS S80i by byl celý povrch válcových ploch šroubu obroben na hotovo. Drsnosti Ra 1,6 a 0,8 lze na tomto stroji dosáhnout. Dále vznikne úspora v podobě manipulace s materiálem, upínání obrobku a prostožů, protože bruska na kulato bude z technologického postupu vyřazena. Dále nebude nutné upravovat brusné kotouče, které bude možné použít na jiných zakázkách v původním tvaru. Díky číslíkové řízenému soustruhu lze zkosené hrany a rádiusy vyrobit pomocí CNC programování. Rozdíl nastává i hodinových sazbách na dělníka a výrobní a správní režii. Pracoviště s bruskou je dražší než pracoviště s CNC soustruhem.

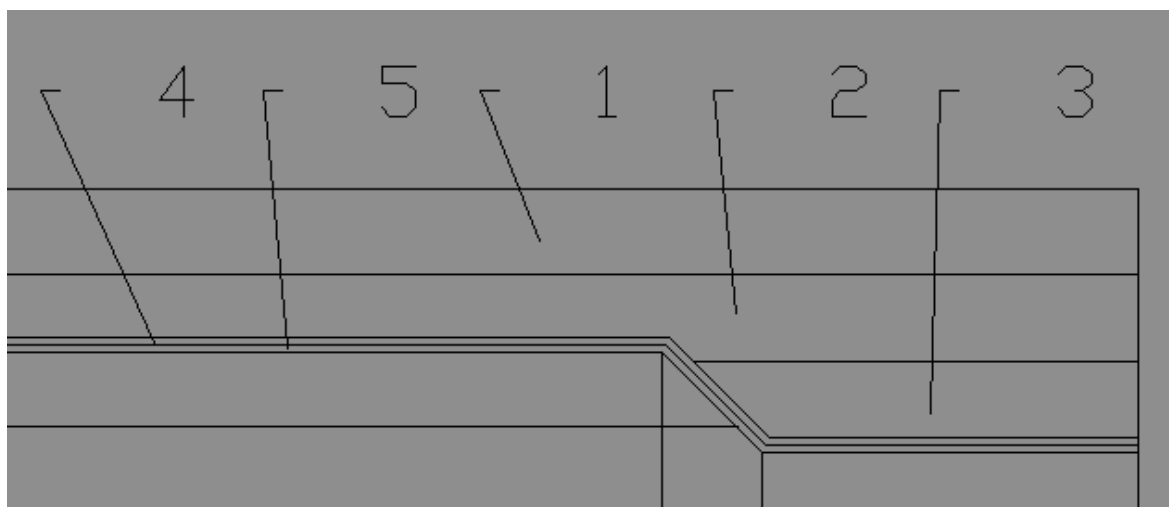
Šířka záběru ostří pro variantu A (viz. Obr. 3.16, 3.17, 3.18 a Tab. 3.14)



Obr. 3.16 – Plocha č. 1 (ø76h12).



Obr. 3.17 – Plocha č. 3 (ø72h12).

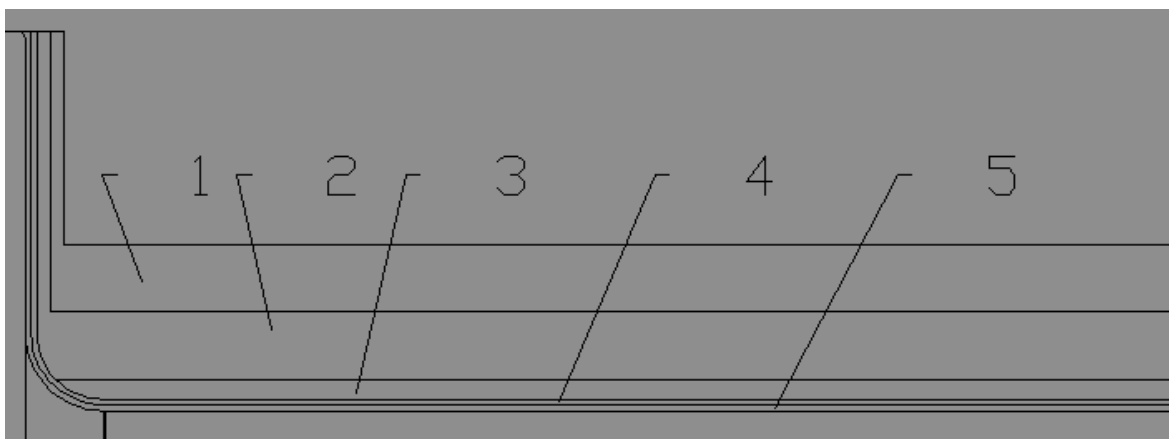


Obr. 3.18 – Závít M80x4.

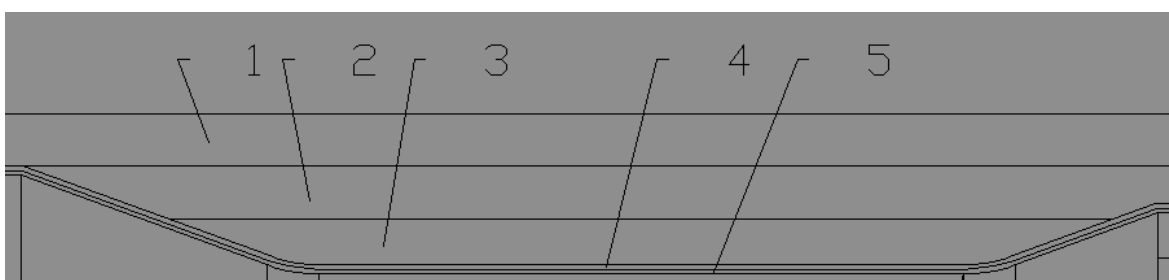
Tab. 3.14 – Hodnoty šířky záběru ostří.

	Hrubování			Dokončování		Broušení
Tříska	1	2	3	4	5	6
Šířka záběru ostří a_p [mm]	3,4	3,5	3	0,3	0,3	0,45

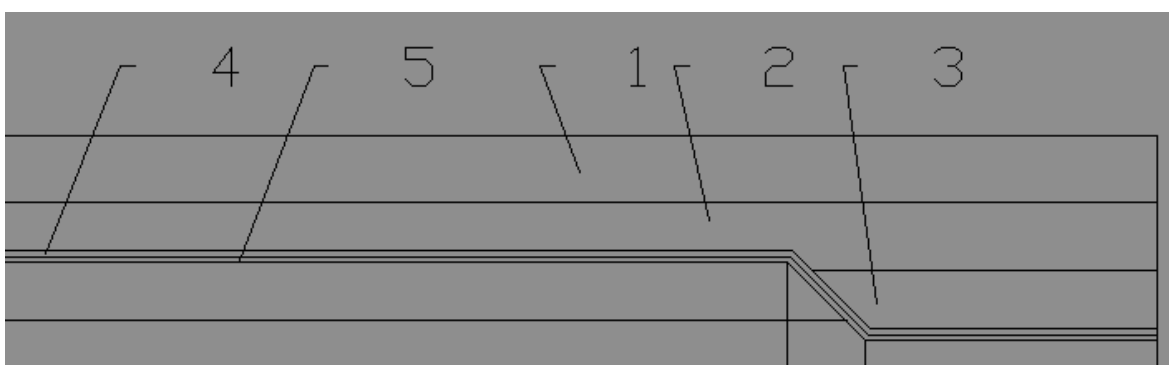
Šířka záběru ostří pro variantu B (viz. Obr. 3.19, 3.20, 3.21 a Tab. 3.15)



Obr. 3.19 – Plocha č. 1 (ø76h12).



Obr. 3.20 – Plocha č. 3 (ø72h12).



Obr. 3.21 – Závít M80x4.

Tab. 3.15 – Hodnoty šířky záběru ostří.

	Hrubování			Dokončování	
Tříška	1	2	3	4	5
Šířka záběru ostří a_p [mm]	3,4	3,5	3	0,3	0,3

3.7.2. Výkon motoru a využití stroje (viz. Obr. 3.22)

Základní a zadané hodnoty pro hrubování:

$$f = 0,3 \text{ [mm/ot.]}$$

$$v_c = 120 \text{ [m/min]}$$

$$a_p = 3,4 \text{ [mm]}$$

$$P_{\max} = 20,5 \text{ [kW]}$$

Otáčky [11]

$$n = \frac{v_c}{\pi \cdot D \cdot 10^{-3}} = \frac{120}{\pi \cdot 89 \cdot 10^{-3}} = 249,2 \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad (3.1)$$

Posuvová rychlost [11]

$$v_f = n \cdot f = 249,2 \cdot 0,3 = 128,7 \text{ [m/min]} \quad (3.2)$$

Rychlost řezného pohybu [30]

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} = \sqrt{120^2 + 128,7^2} = 176 \text{ [m/min]} \quad (3.3)$$

Řezná síla [11]

$$F_c = k_{F_c} \cdot a_p^{x_{F_c}} \cdot f^{y_{F_c}} = 2030 \cdot 3,4^1 \cdot 0,3^{0,78} = 2698,54 \text{ [N]} \quad (3.4)$$

Pasivní síla [11]

$$F_p = k_{F_p} \cdot a_p^{x_{F_p}} \cdot f^{y_{F_p}} = 1950 \cdot 3,4^{0,9} \cdot 0,3^{0,75} = 2377,97 \text{ [N]} \quad (3.5)$$

Posuvová síla [11]

$$F_f = k_{F_f} \cdot a_p^{x_{F_f}} \cdot f^{y_{F_f}} = 1110 \cdot 3,4^{1,2} \cdot 0,3^{0,65} = 2204,08 \text{ [N]} \quad (3.6)$$

Výsledná síla [11]

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_p^2 + F_f^2} = \sqrt{2698,54^2 + 2377,97^2 + 2204,08^2} = 4218,39 \text{ [N]} \quad (3.7)$$

Pracovní síla [30]

$$F_e = \sqrt{F_c^2 + F_f^2} = \sqrt{2698,54^2 + 2204,08^2} = 3484,26 \text{ [N]} \quad (3.8)$$

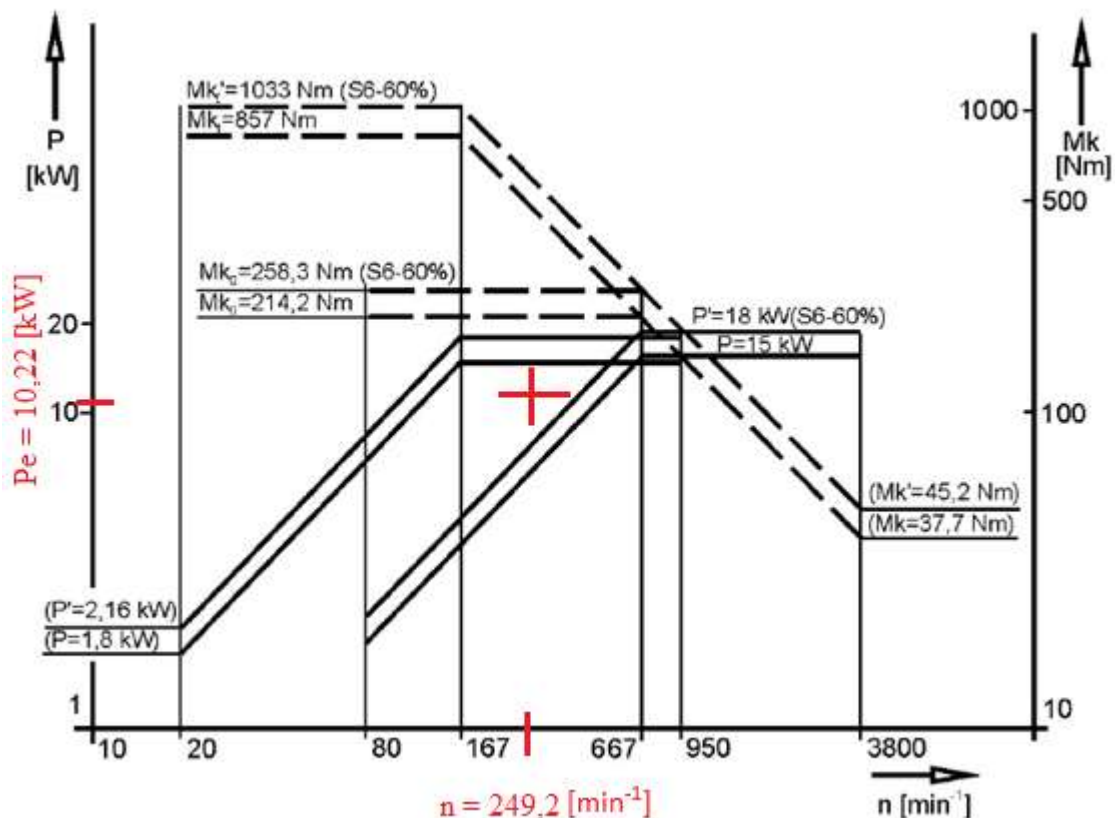
Výkon stroje [30]

$$P_e = \frac{F_e \cdot v_e}{60} = \frac{3484,54 \cdot 176}{60} = 10,22 \text{ [kW]} \quad (3.9)$$

Využití stroje [30]

$$\eta = \frac{P_c}{P_e} = \frac{10,22}{20,5} = 0,4985 = 49,85 \text{ [%]} \quad (3.10)$$

Na obrázku níže je znázorněno kde se při hrubování pohybujeme ve výkonové charakteristice stroje (viz. Obr. 3.22).



Obr. 3.22 – Využití stroje při hrubování [19].

3.7.3. Ohybový moment na vřetenu

Ohybový moment na vřetenu [11]

$$M_o = L_o \cdot \sqrt{F_c^2 + F_p^2} \cdot 10^{-3} = 368 \cdot \sqrt{2698,54^2 + 2377,97^2} \cdot 10^{-3} = 1323,62 \text{ [Nm]} \quad (3.11)$$

kde: M_o [Nm] je ohybový moment na vřetenu,
 L_o [mm] je vzdálenost působíště řezných sil od sklíčidla (viz. Obr. 3.23 na následující straně).

Maximální ohybový moment na vřetenu [11]

$$M_{omax} = 0,75 \cdot \mu \cdot D_u \cdot F_{uo} \cdot 10^{-3} = 0,75 \cdot 0,15 \cdot 115 \cdot 145000 \cdot 10^{-3} = 1875,94 \text{ [Nm]} \quad (3.12)$$

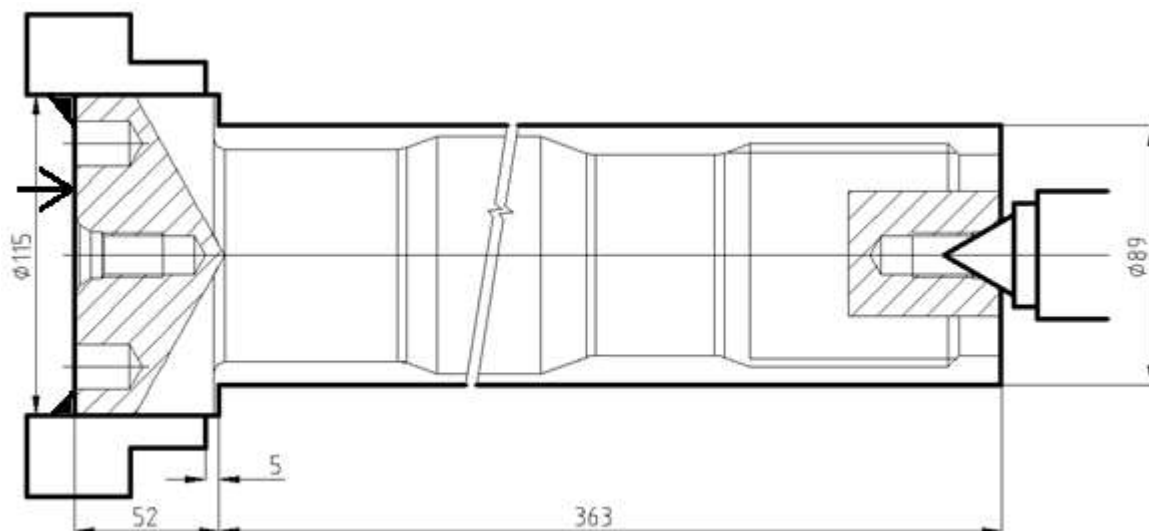
kde: M_{omax} [Nm] je maximální ohybový moment na vřetenu,
 μ [-] je koeficient tření na čelisti,
 D_u [mm] je průměr upnutí,

F_{uo} [N] je upínací síla působící na čelist při nulových otáčkách,
 μ [-] je koeficient tření na čelisti.

Kontrola maximálního ohybového momentu [11]

$$M_o \leq M_{omax} \Rightarrow 1323,62 < 1875,94 \text{ [Nm]} \quad (3.13)$$

Především výpočet potvrzuje, že ohybový moment je menší než maximální a proto při obrábění nehrozí rizika nepřesnosti výroby. Schéma upnutí obrobku je znázorněno na následujícím obrázku (viz. Obr. 3.23).



Pozn.: Silné čáry – Předhrubovaný polotovár a části stroje
 Tenké čáry – Opracování na soustruhu MAS S80i

Obr. 3.23 – Schéma upnutí obrobku.

3.7.4. Náklady na variantu A

Základní a zadané hodnoty pro broušení:

$$p = 0,9 \text{ [mm]}$$

$$b_s = 30 \text{ [mm]}$$

$$n_w = 800 \text{ [min}^{-1}\text{]}$$

$$f_r = 0,004 \text{ [mm]}$$

Dráha nástroje [32]

$$\begin{aligned} l_a &= l_{na} + l_w + l_{pa} = 3 + l_w + \left(l_{na} + \frac{b_s}{2} \right) \\ &= 3 + 45,6 + 20,7 + 120 + 24,2 + 66,9 + 15,2 + 15 + \left(3 + \frac{30}{2} \right) \\ &= 328,6 \text{ [mm]} \end{aligned} \quad (3.14)$$

kde: l_a [mm] je dráha pohybu stolu brusky,
 l_{na} [mm] je délka náběhu v axiálním směru,
 l_{pa} [mm] je délka přeběhu v axiálním směru,
 l_w [mm] je dráha nástroje.

Strojní čas [32]

$$t_{AS} = 2 \cdot \frac{l_a}{f_a \cdot n_w} \cdot \frac{p}{2 \cdot f_r} = 2 \cdot \frac{328,6}{9 \cdot 800} \cdot \frac{0,9}{2 \cdot 0,004} = 10,27 \text{ [min]} \quad (3.15)$$

kde: f_a [mm] je axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku,
 n_w [ot./min] je frekvence otáčení obrobku,
 p [mm] je přírůstek na broušení vztažený na průměr,
 f_r [mm] je radiální posuv stolu brusky na jeden axiální zdvih.

Náklady na strojní práci [11]

$$N_s = t_{AS} \cdot \left[k_c \cdot \left(\frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] = 10,27 \cdot \left[1,13 \cdot \left(\frac{272}{60} + \frac{385}{60} \right) + \frac{450}{60} \right] = 204,1 \text{ [Kč]} \quad (3.16)$$

kde: N_s [Kč] jsou náklady na strojní práci,
 k_c [Kč] je přírůstek směnového času (1,11 až 1,15),
 M_o [Kč/hod] je mzda operátora včetně zdravotního a sociálního pojištění,
 HRP_{SP} [Kč/hod] je hodinový režijní paušál společných nákladů,
 N_{hs} [Kč/hod] jsou hodinové náklady na provoz stroje.

Náklady na nástroje a manipulaci [11]

Následující hodnoty byly stanoveny obsluhou nástrojárny, technologem přípravy výroby a kalkulací firmy.

$$N_n = t_{OS} \cdot \left[k_c \cdot \left(\frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) \right] = 6,4 \cdot \left[1,13 \cdot \left(\frac{322}{60} + \frac{533}{60} \right) \right] = 103 \text{ [Kč]} \quad (3.17)$$

kde: N [Kč] jsou náklady na nástroje a manipulaci.

Celkové náklady na 1 kus [11]

$$N_c = N_s + N_n = 204,1 + 103 = 307,1 \text{ [Kč]} \quad (3.18)$$

kde: N_c [Kč] jsou celkové náklady na 1 kus.

Celkové náklady na 24 kusů [11]

$$N = 24 \cdot N_c = 24 \cdot 307,1 = 7370,4 \text{ [Kč]} \quad (3.19)$$

kde: N [Kč] jsou celkové náklady na 24 kusů.

3.7.5. Náklady na variantu B

Základní a zadané hodnoty pro dokončování:

$f = 0,15$ [mm/ot.]

$v_c = 140$ [m/min]

$a_p = 0,3$ [mm]

Dráha nástroje [11]

$$L = 2 \cdot (17,9 + 68,7 + 129,7 + 20,7 + 42,6 + 13,5 + 71,4 + 5,7 + 15) = 770,4 \text{ [mm]} \quad (3.20)$$

Otáčky pro dokončovací operaci [11]

$$n = \frac{v_c}{\pi \cdot D \cdot 10^{-3}} = \frac{140}{\pi \cdot 80 \cdot 10^{-3}} = 557 \text{ [ot./min]} \quad (3.21)$$

Strojní čas [11]

$$t_{AS} = \frac{L}{n \cdot f} = \frac{770,4}{557 \cdot 0,15} = 9,22 \text{ [min]} \quad (3.22)$$

Náklady na strojní práci [11]

$$N_s = t_{AS} \cdot \left[k_c \cdot \left(\frac{M_o}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) + \frac{N_{hs}}{60} \right] = 9,22 \cdot \left[1,13 \cdot \left(\frac{207}{60} + \frac{294}{60} \right) + \frac{343}{60} \right] = 139,7 \text{ [Kč]} \quad (3.23)$$

Náklady na nástroj vztažené na trvanlivost [11]

Pravá strana vzorce vypadává ($C_{tn} = 0$ Kč), protože byly nakupovány pouze VBD. Nástroj je použitý z jiné zakázky.

$$N_{nT} = \frac{C_d \cdot z_d}{z_b \cdot s_b} + (1 + k_{ut}) \cdot \frac{C_{tn}}{z_u} = \frac{162 \cdot 1}{2 \cdot 0,9} = 90 \text{ [Kč]} \quad (3.24)$$

kde: N_{nT} [Kč] jsou náklady na nástroj vztažené na trvanlivost,
 C_d [Kč] je cena břitové destičky,
 C_{tn} [Kč] je cena tělesa nástroje,
 z_d [-] je počet břitových destiček na nástroji,
 z_b [-] je počet břitů na VBD,
 z_u [-] je předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje,
 s_b [-] je součinitel využití VBD,
 k_{ut} [-] je koeficient údržby tělesa nástroje.

Trvanlivost břitu nástroje [11]

$$T = \frac{60 \cdot N_{nT}}{N_s} = \frac{60 \cdot 90}{139,7} = 38,65 \text{ [min]} \quad (3.25)$$

kde: T [min] je trvanlivost břitu nástroje.

Počet výměn nástroje [11]

$$z_v = \frac{t_{AS}}{T} = \frac{9,22}{38,65} = 0,24 \text{ [-]} \quad (3.26)$$

kde: z_v [-] je počet výměn nástroje.

Náklady na nástroje [11]

$$N_n = z_v \cdot N_{nT} = 0,24 \cdot 90 = 21,6 \text{ [Kč]} \quad (3.27)$$

Náklady na výměnu (znovuseřízení)

$$N_{vn} = t_{vn} \cdot \left[k_c \cdot \left(\frac{M_s}{60} + \frac{HRP_{SP}}{60} \right) \right] = 2 \cdot \left[1,13 \cdot \left(\frac{207}{60} + \frac{294}{60} \right) \right] = 18,9 \text{ [Kč]} \quad (3.28)$$

kde: N_{vn} [Kč] jsou náklady na výměnu (znovuseřízení).

Celkové náklady na 1 kus [11]

$$N_c = N_s + N_n + N_{vn} = 139,7 + 21,6 + 18,9 = 180,2 \text{ [Kč]} \quad (3.29)$$

Celkové náklady na 24 kusů [11]

$$N = 24 \cdot N_c = 24 \cdot 180,2 = 4324,8 \text{ [Kč]} \quad (3.30)$$

3.7.6. Ekonomické zhodnocení obou variant

Tab. 3.16 – Shrnutí nákladů na obě varianty výroby.

Parametr	Jednotka	Varianta A	Varianta B
Strojní čas t_{AS}	[min]	10,27	9,22
Celkové náklady na pracoviště	[Kč]	1112	844
Náklady na výrobu 1 kusu	[Kč]	307,1	180,2
Náklady na výrobu 24 kusů	[Kč]	7370,4	4324,8

Vzhledem k výši nákladů na obě varianty výroby (viz. Tab. 3.16) navrhuji změnu technologického postupu na variantu B. Vyřazení brusky z technologického postupu a obrábění všech ploch součásti na CNC soustruhu je časově a ekonomicky výhodnější. Touto změnou odpadnou i vícepráce spojené s obráběním na brusce (manipulace, upnutí obrobku, úprava brusného kotouče, atd.). Bruska může být dále využita při jiných zakázkách.

4. ZÁVĚR

Pro volbu a optimalizaci řezných podmínek v této práci byl vybrán lícovaný šroub M80x4, který je součástí soustrojí Francisovy turbíny. Slouží jako hlavní spojovací materiál mezi turbínovou hřídelí a mezihřídelí. Pro zajištění polohy hřídelí je nutné dodržet vysokou kvalitu výroby a dodržet drsnost povrchu, rozměry a geometrické tolerance.

Pracovníkem technologické přípravy výroby byl zvolen postup hrubování a částečného dokončování na CNC soustruhu MAS S80i. Finální povrch vybraných ploch byl dokončen na brusce BHU 32/1000. Zadaná drsnost povrchu a rozměry šroubu jsou však vyrobitelné přímo na CNC soustruhu a proto byla navržena druhá varianta výroby, při které byla bruska úplně vyřazena z technologického postupu. Pro porovnání obou variant výroby byly zhodnoceny náklady na stroje, nástroje a obsluhu. Dále byly posouzeny rozdíly ve strojních časech a činnosti, které ze změny technologického postupu vyplývají.

Dokončení šroubu pouze na CNC soustruhu eliminuje vícepráce, které vyžaduje zařazení brusky do technologického postupu. V tomto případě nedochází ke zbytečné manipulaci s obrobky, není nutné upínání obrobku do dalšího stroje a není nutná úprava brusných kotoučů, které už nemusí být využitelné pro další výrobní zakázky. Dále je pracoviště s bruskou pro firmu nákladnější z hlediska mezd obsluhy, nákladů na provoz stroje a správních režii. Provedení výpočtů nákladů potvrdilo skutečnost, že varianta B (vyřazení brusky z technologického postupu) je levnější o 3045,6 Kč.

Z hlediska celkových výdajů a příjmů firmy je výroba 24 kusů této součásti zanedbatelným parametrem, jelikož je úspora 3045,6 Kč. Jedná se o kusovou výrobu, a proto jsou řezné podmínky a technologické postupy navrhovány dle zkušeností pracovníků a osvědčených metod z předešlých zakázek. Pokud by byly prováděny detailnější výpočty řezných podmínek a nákladů na každou operaci každé součásti ve výrobě, byla by nutná větší vytíženost výpočtářů nebo zajištění nové pracovní síly. Náklady na takto kvalifikované zaměstnance v závislosti na jejich časové vytíženosti by mohly přesáhnout výši úspory ve výrobním procesu. V sériové výrobě je tento způsob optimalizace přímo nezbytný z důvodů velkých výrobních dávek totožných součástí.

Tento šroub je součástí vyrobená na míru pouze pro tuto zakázku, a pokud v následujících letech nebude zákazník požadovat rekonstrukci nebo opravu svého zařízení, nemusí být takový šroub už nikdy vyráběn. Nicméně rozmanitost zakázek není příliš vysoká a proto můžeme v budoucnosti předpokládat výrobu velice podobných součástí a to nejen v oblasti vodních turbín, ale i při výrobě klapkových a kulových uzávěrů nebo potrubí. Za tohoto předpokladu by měl způsob této optimalizace příznivý vliv na časovou a nákladovou efektivitu zakázek.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MÁDL, Jan. ČVUT. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění*. 3. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1988. 58 s.
- [2] MÁDL, Jan. *Optimalizace řezných podmínek v teorii obrábění: Doplnkové skriptum: pro stud. fak. strojní*. 4. vyd. Praha: ČVUT, 1990. ISBN 80-010-0323-X. 58 s.
- [3] KOČMAN, Karel. *Speciální technologie. Obrábění*. 2. přeprac. vyd. Brno: PC-DIR Real, 1993, ISBN 80-214-1187-2. 213 s.
- [4] KOČMAN, Karel a Jaroslav PROKOP. *Výrobní technologie II: [obrábění]*. Brno: CERM, 2002, 83 s. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství). ISBN 80-214-2189-4.
- [5] DRASTÍK, František. *Přesnost strojních součástí podle mezinárodních norem: tolerování rozměrů a geometrických vlastností*. Ostrava: Montanex, 1996, 271 s. ISBN 80-857-8018-6.
- [6] KRUPKA, Ondřej. *Volba a optimalizace řezných podmínek pro progresivní výrobní technologie*. Brno, 2014. Diplomová práce. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
- [7] MÁDL, Jan. Optimalizace při obrábění (řezné parametry). [online]. [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://fstroj.uct.sk/journal/sk/013/013.htm>
- [8] BRYCHTA, Josef. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava: VŠB, 2008. ISBN 9788024815053.
- [9] DOUHÝ, Milan, Josef HOUDEK a Jaroslav KOLOC. *Slinuté karbidy pro obrábění*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. 380 s.
- [10] VLACH, B. – AJ.: *Technologie obrábění a montáží*, 1. vyd. SNTL Praha 1990.
- [11] MÁDL, Jan a Ivo KVASNIČKA. *Optimalizace obráběcího procesu*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1998, 168 s. ISBN 80-01-01864-4.
- [12] INDRAJIT MUKHERJEE, PRADIP KUMAR RAY. *A review of optimization techniques in metal cutting processes*. Computers & Industrial Engineering, 50 (2006) pp.15–34. ISSN 0360-8352.
- [13] [online]. VUT Brno [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/optimalizace/pojmy/pojmy_a.htm
- [14] Vertical turning centers. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.machinegroup.cz/katalog/vtc_serie.pdf
- [15] CNC obráběcí centra. INAXES. [online]. [cit. 2015-03-24]. Dostupné z: http://www.cnc-inaxes.cz/DATA/download/cz/CNC%20vertikalni%20centra_rada%20FB.pdf
- [16] HOLOUBEK, Josef. *Ekonomicko-matematické metody*. Vyd. 1. V Brně: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita, 2006, 153 s. ISBN 80-7157-970-x.
- [17] SANDVIK COROMANT. [online]. [cit. 2015-03-25]. Dostupné z: http://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/getting_started/milling_different_materials/hrsa_and_titanium_milling/pages/default.aspx
- [18] PŘIKRYL, Zdeněk. *OBRÁBĚNÍ: TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957.
- [19] *Návod k používání číslicově řízeného soustrunu S80i*. Sezimovo ústí: KOVOSVIT MAS, a.s.
- [20] PT KOVO. [online]. Vysoké Mýto [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.ptkovo.cz/index.php?show=nastroje-walter>
- [21] WALTER CZ SPOL.SR.O. *Katalog Walter*. 2012. Dostupné z: www.walter-tools.com

- [22] TOMIS, Jan. *Vliv velikosti zaoblení ostří na trvanlivost VBD: Bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. s. 51, 1. příloha. Vedoucí práce Ing. Martin Binder.
- [23] BOLZANO. *Katalog oceli 42CrMo4* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10083/MOP_vlastnosti_42CrMo4.pdf
- [24] PROMINENT, a.s. *Přístroj na měření drsnosti povrchu: SJ-301*. Kroměříž. Dostupné z: www.prominent-km.cz
- [25] MITUTOYO ČESKO S.R.O. *Drsnoměry měření jakosti povrchu*. Teplice. Dostupné z: www.mitutoyo-czech.cz
- [26] KOVO KOUDELKA S.R.O. [online]. Damník [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: <http://www.kovo-vyroba.cz/>
- [27] SANDVIK COROMANT. [online]. Praha [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz>
- [28] [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: http://www.mmspektrum.com/content/image/gallery/2012-01_7_1328714224/secotools_obr_01.jpg
- [29] [online]. [cit. 2015-05-14]. Dostupné z: http://web.quick.cz/brousenikovu/obrazky/brouseni_na_plocho.jpg
- [30] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: Technologie obrábění - 1. část*. Vysoké učení technické v Brně, 2003.
- [31] HLUCHÝ, Miroslav. *Strojírenská technologie 2: Polotovary a jejich technologičnost*. Praha: Nakladatelství technické literatury, n.p., 1979.
- [32] HUMÁR, Anton. *TECHNOLOGIE I: Technologie obrábění - 3. část*. Vysoké učení technické v Brně, 2005.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost
ACC	[-]	Adaptivní řízení mezních systémů
CNC	[-]	Computer numerical control (numerické řízení počítačem)
HB	[-]	Tvrdost dle Brinella
HRC	[-]	Tvrdost dle Rocwella
HSS	[-]	High speed steel (rychlořezná ocel)
KV	[J]	Vrubová houževnatost
NC	[-]	Numerical control (numerické řízení)
PC	[-]	Personal computer (osobní počítač)
Re	[MPa]	Mez kluzu
Rm	[MPa]	Mez pevnosti
TPV	[-]	Technologická příprava výroby
VBD	[-]	Vyměnitelná břitová destička

Symbol	Jednotka	Popis
μ	[-]	Koeficient tření na čelisti
A	[mm ²]	Průřez třísky
a_p	[mm]	Šířka záběru ostří
b	[mm]	Šířka třísky
C_d	[Kč]	Cena břitové destičky
C_{tn}	[Kč]	Cena tělesa nástroje
c_v	[-]	Empirická konstanta
d	[ks]	Počet vyráběných kusů
D_c	[mm]	Průměr obrábění
D_s	[Kč/hod]	Náklady na hodinu strojní práce
D_u	[mm]	Průměr upnutí
f	[mm]	Posuv na otáčku
f_a	[mm]	Axiální posuv stolu brusky na jednu otáčku
F_c	[N]	Řezná síla
F_{cmax}	[N]	Maximální řezná síla
F_f	[N]	Posuvová síla
F_{fmax}	[N]	Maximální posuvová síla
F_p	[N]	Pasivní síla
F_{pmax}	[N]	Maximální pasivní síla
f_r	[mm]	Radiální posuv stolu brusky na jeden axiální zdvih
F_u		Upínací síla působící na čelisti
F_{uo}		Upínací síla působící na čelist pro n=0
f_z	[mm]	Posuv na zub
h	[mm]	Tloušťka třísky
HRP_{SP}	[Kč/hod]	Hodinový režijní paušál společných nákladů
k_C	[Kč]	Přirážka směnového času (1,11 až 1,15)
k_{Fc}	[-]	Konstanta
k_{Ff}	[-]	Konstanta

k_{Fp}	[-]	Konstanta
k_n	[-]	Konstanta udaná výrobcem stroje
k_{ut}	[-]	Koeficient údržby tělesa nástroje
L	[mm]	Dráha nástroje ve směru posuvu
l	[mm]	Délka soustružené plochy
L_0	[mm]	Vzdálenost působíště řezných sil od sklíčidla
l_a	[mm]	Dráha pohybu stolu brusky
l_m	[mm]	Délka obrábění
l_n	[mm]	Délka náběhu
l_{na}	[mm]	Délka náběhu v axiálním směru
l_p	[mm]	Délka přeběhu
l_{pa}	[mm]	Délka přeběhu v axiálním směru
l_r	[mm]	Délka měření
l_w	[mm]	Dráha nástroje
m	[-]	Empirická konstanta
m_c	[-]	Nárůst křivky k_c
M_k	[Nm]	Krouticí moment na vřetenu
M_{ke}	[Nm]	Maximální krouticí moment pohonu
M_o	[Kč/hod]	Mzda operátora včetně zdravotního a sociálního pojištění
M_o	[Nm]	Ohybový moment na vřetenu
M_{omax}	[Nm]	Maximální ohybový moment na vřetenu
N	[Kč]	Náklady na uvažovaný operační úsek
n	[min ⁻¹]	Otáčky vřetene
N_B	[Kč]	Náklady dávkové
N_C	[Kč]	Celkové výrobní náklady na obrobek
N_c	[Kč]	Operační výrobní náklady
N_{hs}	[Kč/hod]	Hodinové náklady na provoz stroje
N_i	[Kč]	Výrobní náklady i-tý operační úsek
N_n	[Kč]	Náklady na nástroje vztažené na operační úsek
N_n	[Kč]	Náklady na nástroj a jeho výměnu
N_{nT}	[Kč]	Náklady na nástroj vztažené na trvanlivost
N_s	[Kč]	Náklady na strojní práci
N_{sm}	[Kč]	Náklady na minutu strojní práce
N_{SZ}	[Kč]	Náklady na speciální zařízení
N_T	[Kč]	Náklady na nástroj a jeho výměnu
N_v	[Kč]	Náklady na vedlejší práci
N_{vm}	[Kč]	Náklady na minutu vedlejší práce
N_{vn}	[Kč]	Náklady na výměnu VBD nebo seřízení nástroje
n_w	[ot./min]	Frekvence otáčení obrobku
p	[mm]	Přídavek na broušení vztažený na průměr
P_c	[W]	Řezný výkon
P_e	[W]	Výkon elektromotoru stroje
P_m	[kW]	Výkon obráběcího stroje
P_{max}	[kW]	Maximální výkon CNC soustruhu MAS S80i
P_{mot}	[kW]	Potřebný výkon na vřetenu
Q	[cm ³ /min]	Objem materiálu za jednotku času
r	[mm]	Rohový rádius VBD

R_a	[μm]	Střední aritmetická výška nerovností
R_{max}	[μm]	Drsnost profilu
R_p	[μm]	Největší výška výstupku profilu
R_q	[μm]	Střední kvadratická výška nerovností
R_v	[μm]	Největší hloubka prohlubně profilu
R_z	[μm]	Průměrná výška nerovností
s_b	[-]	Součinitel využití VBD
S_m	[μm]	Střední rozteč nerovností
T	[hod]	Trvanlivost nástroje
t_{AS}	[min]	Strojní čas
t_{AV}	[min]	Jednotkový vedlejší čas
t_h	[min]	Čas obrábění
T_{optN}	[min]	Optimální trvanlivost nástroje
t_{vn}	[min]	Čas na výměnu nástroje
U	[cm^3/min]	Úběr materiálu
uu	[-]	Počet operačních úseků na obrobku
v_c	[m/min]	Řezná rychlost
v_f	[m/min]	Posuvová rychlost
x_{Fc}	[-]	Empirická konstanta
x_{Ff}	[-]	Empirická konstanta
x_{Fp}	[-]	Empirická konstanta
x_v	[-]	Empirická konstanta
y_{Fc}	[-]	Empirická konstanta
y_{Ff}	[-]	Empirická konstanta
y_{Fp}	[-]	Empirická konstanta
y_v	[-]	Empirická konstanta
z_b	[-]	Počet břitů na VBD
z_d	[-]	Počet břitových destiček na nástroji
Z_p	[μm]	Výstupek profilu
z_u	[-]	Předpokládaný počet upnutí destiček za dobu životnosti tělesa nástroje
Z_v	[μm]	Prohlubeň profilu
z_v	[-]	Počet výměn nástroje, vztažený na obrobení jednoho kusu
γ	[°]	Úhel čela
η	[-]	Mechanická účinnost obráběcího stroje
K	[°]	Úhel nastavení hlavního ostří
λ_s	[°]	Úhel sklonu
η	[-]	Mechanická účinnost stroje

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1 – Inspekční certifikát dodavatele polotovaru

Příloha č. 1 – Inspekční certifikát dodavatele polotovaru

HUTA STALI JAKOŚCIOWYCH S.A. Adres: str. E. Kwiatkowskiego 1 37-450 Stalowa Wola POLAND tel: 48 15 813 51 84 NIP: 118-12-34-296		ORIGINAL Copy of certificate only for information									
INSPECTION CERTIFICATE No 33950/14 EN 10204:2004/3.1		Lucia.Prokopova@schmolz-bickenbach.cz									
Customer: Schmolz+Bickenbach s.r.o. Kladno DUBI ul. U Borovin 219											
Delivery address: DSC Hustopece Nadrazni 41 693 01 Hustopece u Brna, CZ											
Customer order No: 1849018478		Order No: 264.1110.229.4									
Receipt Report No: 3771											
Description: Hot rolled steel bars Delivery condition: quenched and tempered EN 10083-3:2008 WNR 1.7225 EN 10060 as stock for machined parts		Dimension: Ø 120 Length: limited: 5-6,2m Reduction ratio 7.6									
Steel type: 42CRMO4+QT		Heat No: 17414 EAF + CC Radio-isotopic activity is no higher than 100 Bq/kg									
Pieces: 6		Weight: 3 200									
1. Chemical Analysis:											
Heat No	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Alc
17414	0.4300	0.8100	0.2800	0.0150	0.0270	1.1500	0.1100	0.2400	0.2200	0.0020	0.0230
	Ti	N2	Sn								
	0.0030	0.0114	0.0160								
2. Mechanical properties and hardness											
Heat No	Test No	Heat treatment	[MPa]	Rm [MPa]	[%]	Z [%]	Impact	Heat treatment tests	Hardness		
17414	1	quenched and tempered	Re 726	854	22.4	65.2	KV +20°C [J] 99/96/96 KV -20°C [J] 79/80/75				
3. Other tests											
Macroetch test: PN-57/H-04501								Satisfactory results			
Microinclusions: DIN 50602 K4(o) = 0								Grain size:			
Ultrasonic test was carried out acc. to: SEP 1920, B1 class -satisfactory results. Surface defects acc. to: PN-EN 10221 class B.											
Surface and dimensions tested at 100%. MIXMATCH TEST 100%				Material was carried out acc. to Technical Specifications and order confirmation				Material marked: Heat No, grade,			
Material was released on the base of inspection and tests carried out. The product in accordance with European Directive No 2000/53/WE.											
Quality Control		The quality manager		Expert stamp		Stalowa Wola 2014.09.04					
		KIEROWNIK Działu Kontroli Jakości Huta Stali Jakościowych S.A. mgr inż. Tomasz Węcek									

RSW/RSJQ-22/1

12-01-2015

